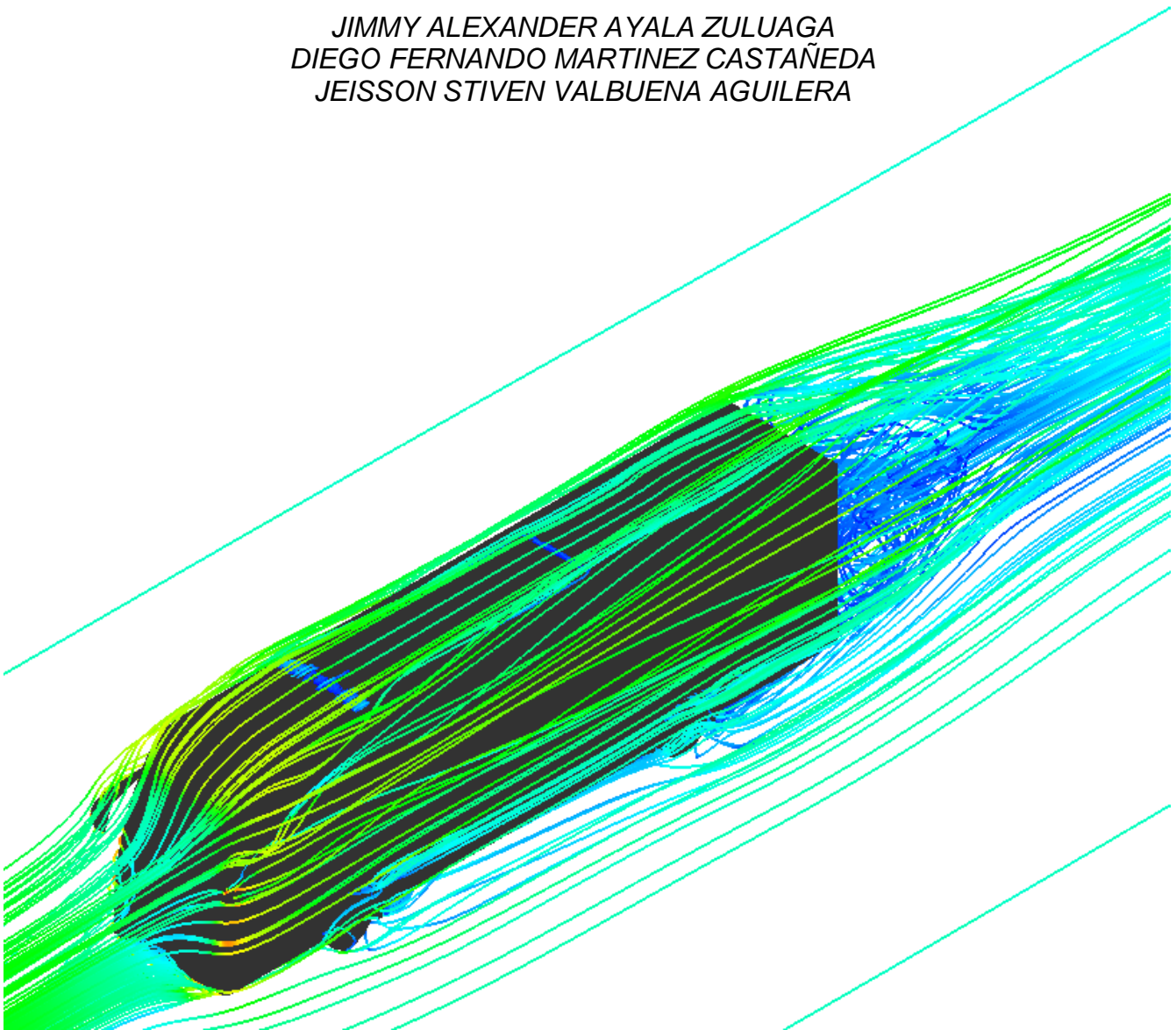


**DISEÑO DE UN DISPOSITIVO REDUCTOR DE LA RESISTENCIA
AERODINÁMICA EN UN BUS INTERMUNICIPAL**

*JIMMY ALEXANDER AYALA ZULUAGA
DIEGO FERNANDO MARTINEZ CASTAÑEDA
JEISSON STIVEN VALBUENA AGUILERA*



*DISEÑO DE UN DISPOSITIVO REDUCTOR DE LA RESISTENCIA
AERODINÁMICA EN UN BUS INTERMUNICIPAL*

*JIMMY ALEXANDER AYALA ZULUAGA
DIEGO FERNANDO MARTINEZ CASTAÑEDA
JEISSON STIVEN VALBUENA AGUILERA*

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
*FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ, D. C.
2017*

*DISEÑO DE UN DISPOSITIVO REDUCTOR DE LA RESISTENCIA
AERODINÁMICA EN UN BUS INTERMUNICIPAL*

*JIMMY ALEXANDER AYALA ZULUAGA
DIEGO FERNANDO MARTINEZ CASTAÑEDA
JEISSON STIVEN VALBUENA AGUILERA*

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Aeronáutico

Director:
John Jairo Vaca Ríos
Ingeniero Aeronáutico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ, D. C.
2017

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C. 2 de febrero de 2017

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Dedicamos este proyecto a nuestros padres, aquellas personas que nos inspiraron y apoyaron, a quienes sueñan con el progreso de la sociedad por medio de la investigación.

“Es posible volar sin motores, pero no sin conocimiento y habilidad. Considero que es esto algo afortunado, para el hombre, por causa de su mayor intelecto, ya que es más razonable la esperanza de igualar a los pájaros en conocimiento, que igualar a la naturaleza en la perfección de su maquinaria”

Wilbur Wright

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios y a nuestra patria por brindarnos la oportunidad de vivir esta grata experiencia y darnos la fortaleza para superar cada obstáculo, a nuestras familias por ser la principal fuente de motivación y consejo, a nuestros docentes y colaboradores ya que fueron indispensables en cada una de las etapas de este proyecto. De manera especial agradecemos a la Fundación Universitaria Los Libertadores por ser nuestro hogar y mostrarnos el camino profesional durante los últimos años, a John Jairo Vaca Ríos por ser nuestro mentor y guía durante este proceso formativo, a Sandy Daniela Sanchez Soache por su importante colaboración durante la experimentación, a la Red Tecnoparque SENA Nodo Bogotá por ser impulsores de nuevo conocimiento con sus instalaciones, equipos y asesores, principalmente al Ingeniero John Eduard Gómez Bohórquez por su entrega con esta gran labor.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. BUSES INTERMUNICIPALES	21
3.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	21
3.2 SITUACIÓN EN COLOMBIA	22
3.3 ESTUDIOS RECIENTES	23
3.4 AERODINÁMICA DE UN VEHÍCULO	25
3.5 EXPERIMENTACIÓN EN TÚNEL DE VIENTO	29
3.6 DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	30
4. FABRICACIÓN DEL MODELO A ESCALA	34
4.1 ELECCIÓN DEL BUS INTERMUNICIPAL	34
4.2 ESCANEEO 3D	34
4.3 POS-PROCESAMIENTO DE LA NUBE DE PUNTOS Y OBTENCIÓN DEL CAD	36
4.4 ELABORACIÓN DEL MODELO	39
5. EXPERIMENTACIÓN EN TÚNEL DE VIENTO	43
5.1 PRUEBAS DE VISUALIZACIÓN	43
5.2 PRUEBAS DE FUERZA	45
6. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	48
7. RESULTADOS	54
7.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES SIN DISPOSITIVO	54
7.1.1 Resultados de resistencia aerodinámica.	54
7.1.2 Visualización experimental del comportamiento aerodinámico del bus.	56
7.2 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES SIN DISPOSITIVO	60
7.2.1 Datos de las simulaciones con dominio recomendado por la literatura.	60

7.2.2 Datos de las simulaciones del dominio con sección transversal del túnel de viento sin dispositivo.	62
7.3 RESULTADOS CON DISPOSITIVOS	68
7.3.1 Diseño de los Dispositivos.	68
7.3.2 Generador de Vórtices (VG).	70
7.3.2.1 Generador de Vórtices Simple (VG Simple) – Dispositivo 1.	70
7.3.2.2 Generadores de Vórtices Dobles (VG Dobles) – Dispositivo 2.	79
7.3.3 Carriles – Dispositivo 3	86
7.3.4 Laterales - Dispositivo 4.	94
7.4 COMPILACIÓN RESULTADOS DE COEFICIENTES DE DRAG	103
8. CONCLUSIONES	104
9. RECOMENDACIONES	106
10. BIBLIOGRAFÍA	107

LISTA DE TABLAS

Pág

<i>Tabla 1. Componentes del Metra Scan 3D.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 2. Características del solido Post-procesado.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3. Herramientas de impresión 3D</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 4. Variables de la simulación computacional</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 5. Equipos de cómputo utilizados</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 6. Variables físicas y condiciones presentes durante la toma de datos experimentales.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 7. Resultados datos experimentales.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 8. Valor del C_D con diferente número de elementos (Dominio literatura)</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 9. Valor del C_{P-STSD}, C_{V-STSD} y C_{D-STSD} respecto al número de elementos de las mallas simuladas y Error porcentual respecto al C_{D-ESD}, (0,3951)</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 10. Resultados con los tres métodos estudiados.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 11. Dispositivos óptimos en pruebas experimentales en túnel de viento</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 12. Resultados datos experimentales</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 13. Valor del C_{P-SCD1}, C_{V-SCD1} y C_{D-SCD1} respecto al número de elementos de las mallas simuladas y Error porcentual respecto al C_{D-ECD1} 0,3671 y C_{D-STSD} 0,4131</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 14. Resultados datos experimentales</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 15. Diferencia del C_D de las simulaciones del Dispositivo 2.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 16. Resultados datos experimentales</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 17. Diferencia del C_D de las simulaciones del Dispositivo 3.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 18. Resultados datos experimentales</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 19. Diferencia del C_D de las simulaciones del Dispositivo 4.....</i>	<i>96</i>

LISTA DE GRÁFICAS

Pág

Gráfica 1. Distribución red vial.	23
Gráfica 2. Porcentaje de reducción de combustible vs reducción C_D en buses.....	27
Gráfica 3. Comparación entre Drag aerodinámico y resistencia por rodadura	28
Gráfica 4. Resultados experimentales del Coeficiente de Drag del Bus Sin Dispositivo, (C_{D-ESD}).	56
Gráfica 5. Convergencia de malla del dominio recomendado por la Literatura.....	61
Gráfica 6. Porcentaje de diferencia de la fuerza con el siguiente valor.....	61
Gráfica 7. Comportamiento de los coeficientes C_{P-SSD} , C_{V-SSD} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas dominio literatura	62
Gráfica 8. Convergencia de malla para el dominio con sección transversal del túnel de viento	63
Gráfica 9. Comportamiento de los coeficientes C_P , C_V , respecto al número de elementos de las mallas simuladas para ambos dominios	63
Gráfica 10. Error porcentual entre los datos de coeficiente de Drag experimental (C_{D-ESD}) y simulado (C_{D-STSD}) sin dispositivos.....	64
Gráfica 11. Resultados Experimentales para las Pruebas con el Dispositivo 1	71
Gráfica 12. Convergencia de malla para las simulaciones del Dispositivo 1	72
Gráfica 13. Comparación de los coeficientes C_{P-SCD1} , C_{V-SCD1} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas y la Gráfica 9	73
Gráfica 14. Error porcentual entre los datos de Coeficiente de Drag experimental (C_{D-ECD1}) y simulado (C_{D-SCD1})	74
Gráfica 15. Presión sobre el plano superior del bus respecto a polylines en plano de simetría a 1cm y 2cm de este	76
Gráfica 16. Velocidad sobre el plano superior del bus respecto a líneas en plano de simetría, a 1cm y 2cm de este.	78
Gráfica 17. Pruebas de fuerza del bus con el dispositivo 2 en túnel de viento	80
Gráfica 18. Convergencia de malla.....	80
Gráfica 19. Comparación de los coeficientes C_{P-SCD2} , C_{V-SCD2} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas y la Gráfica 9	81
Gráfica 20. Error porcentual entre los datos de Coeficiente de Drag experimental (C_{D-ECD2}) y simulado (C_{D-SCD2})	82
Gráfica 21. Presión sobre el modelo utilizando polylines.....	83
Gráfica 22. Velocidad sobre el plano superior del bus.....	85
Gráfica 23. Resultados experimentales para las pruebas con el Dispositivo 3.....	87
Gráfica 24. Convergencia de malla.....	88

Gráfica 25. Comparación de los coeficientes C_{P-SCD3} , C_{V-SCD3} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas y la Gráfica 9	89
Gráfica 26. Error porcentual entre los datos de Coeficiente de Drag experimental (C_{D-ECD2}) y simulado (C_{D-SCD2})	89
Gráfica 27. Presión sobre el modelo usando polylines	91
Gráfica 28. Velocidad sobre el Dispositivo 3.....	94
Gráfica 29. Coeficiente de fuerza resistencia al avance laterales 2 túnel de viento	96
Gráfica 30. Coeficiente de fuerza resistencia al avance laterales 2 túnel de viento	97
Gráfica 31. Comparación de los coeficientes C_{P-SCD4} , C_{V-SCD4} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas y la Gráfica 9	97
Gráfica 32. Error porcentual entre los datos de Coeficiente de Drag experimental (C_{D-ECD4}) y simulado (C_{D-SCD4})	98
Gráfica 33. Presión sobre el modelo usando polylines con Dispositivo 4	100
Gráfica 34. Velocidad sobre el Dispositivo 4.....	102
Gráfica 35. Compilación de resultados Coeficiente de Drag.....	103

LISTA DE FIGURAS

	<i>Pág</i>
<i>Figura 1. Tram-bus construido por Gaubshat, 1936</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2. Flujo alrededor de un modelo del primer Volkswagen van. 1951</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. Generador de vórtices y vectores de velocidad alrededor del punto de separación</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4. Fuerzas que actúan sobre un Bus</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5. Coeficiente de Drag para diferentes tipos de vehículos.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Definición del área frontal A de un vehículo.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7. Modelos de turbulencia disponibles en Fluent</i>	<i>32</i>
<i>Figura 8. Escaneo del modelo</i>	<i>36</i>
<i>Figura 9. Post-procesamiento de la nube de puntos.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 10. Comprobación de modificación del solido.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 11. Proceso de modelado CAD</i>	<i>39</i>
<i>Figura 12. Separación de las piezas del bus</i>	<i>40</i>
<i>Figura 13. Vaciado de la sección intermedia del modelo.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14. Acabados del modelo</i>	<i>42</i>
<i>Figura 15. Modelo finalizado</i>	<i>42</i>
<i>Figura 16. Prueba de visualización de campo con humo.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 17. Prueba de visualización superficial con aceite y TiO₂</i>	<i>44</i>
<i>Figura 18. Visualización superficial con el uso de hilos (tufts)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 19. Bosquejos iniciales del sistema de medición de fuerza</i>	<i>45</i>
<i>Figura 20. Montaje del sistema de medición de fuerza en la sección de pruebas .</i>	<i>46</i>
<i>Figura 21. Guía del modelo en la sección de pruebas.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 22. Diagrama de cuerpo libre del sistema de medición de fuerza</i>	<i>47</i>
<i>Figura 23. Secuencia de la simulación</i>	<i>49</i>
<i>Figura 24. Dominio recomendado por la literatura con cuerpos de influencia</i>	<i>50</i>
<i>Figura 25. Condiciones de frontera de los dominios.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 26. Elementos que componen el dominio.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 27. Secciones del modelo.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 28. Prueba de visualización de mezcla de aceite de linaza y dióxido de titanio.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 29. Líneas de flujo superficial</i>	<i>58</i>
<i>Figura 30. Prueba de visualización método Tufts</i>	<i>59</i>
<i>Figura 31. Prueba de visualización con humo</i>	<i>60</i>
<i>Figura 32. Contornos de presión.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 33. Contorno de velocidad sobre el plano de simetría del bus</i>	<i>65</i>
<i>Figura 34. Vectores de velocidad.....</i>	<i>66</i>

<i>Figura 35. Streamlines de velocidad.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 36. Isosuperficie de la Energía Cinética Turbulenta a un valor constante de 28.65 J/kg</i>	<i>67</i>
<i>Figura 37. Dispositivos impresos en 3D.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 38. Planos de los Generadores de Vórtices.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 39. Disposición del dispositivo 1 en el modelo.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 40. Prueba de visualización de Tufts del modelo con dispositivo 1</i>	<i>75</i>
<i>Figura 41. Contorno de presión</i>	<i>75</i>
<i>Figura 42. Contornos y streamline de Velocidad</i>	<i>77</i>
<i>Figura 43. Disposición del dispositivo 2 en el modelo.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 44. Pruebas del dispositivo 2 con Tufts en túnel de viento</i>	<i>82</i>
<i>Figura 45. Contorno de presión en el plano de simetría del modelo con el dispositivo 2.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 46. Contorno de energía cinética turbulenta en el plano de simetría.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 47. Contorno de velocidad del modelo con el dispositivo 2 en el plano de simetría</i>	<i>84</i>
<i>Figura 48. Energía Cinética Turbulenta a 260 J/Kg</i>	<i>85</i>
<i>Figura 49. Planos del dispositivo</i>	<i>86</i>
<i>Figura 50. Disposición del Dispositivo 3 en el modelo</i>	<i>87</i>
<i>Figura 51. Pruebas del dispositivo 3 en túnel de viento.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 52. Interpretación del flujo sobre el modelo</i>	<i>90</i>
<i>Figura 53. Contorno de presión sin y con Carriles</i>	<i>91</i>
<i>Figura 54. Contorno de velocidad sobre el modelo con Carriles</i>	<i>92</i>
<i>Figura 55. Contornos y streamline de velocidad sobre el modelo.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 56. A. Región de núcleo de vórtices B. Energía cinética turbulenta a 28,65 J/Kg.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 57. Disposición y dimensiones del dispositivo Laterales en el modelo</i>	<i>95</i>
<i>Figura 58. Comparación pruebas de visualización hilos con y sin el dispositivo ...</i>	<i>98</i>
<i>Figura 59. Comparación pruebas de visualización dióxido titanio con y sin el dispositivo</i>	<i>99</i>
<i>Figura 60. Líneas de flujo sobre la superficie del bus</i>	<i>99</i>
<i>Figura 61. Contornos de presión zona del dispositivo</i>	<i>101</i>
<i>Figura 62. Contorno de velocidades sobre plano paralelo al plano de simetría...</i>	<i>101</i>
<i>Figura 63. Contornos de velocidad paralelos al suelo</i>	<i>102</i>

LISTA DE ANEXOS

	<i>Pág</i>
<i>ANEXO A Modelos de buses presentes en compañías de transporte intermunicipal colombianas</i>	<i>109</i>
<i>ANEXO B Planos del bus Marcopolo paradisso 1200 G7.....</i>	<i>110</i>
<i>ANEXO C Cálculos</i>	<i>111</i>
<i>ANEXO D Información adicional de relevancia de las mallas utilizadas en las simulaciones</i>	<i>116</i>

LISTA DE SIMBOLOS

C_D	<i>Coeficiente de Drag o resistencia aerodinámica.</i>
C_{D-Bus}	<i>Coeficiente de Drag experimental bus.</i>
C_{D-SSD}	<i>Coeficiente de Drag simulación dominio literatura sin dispositivo.</i>
C_{D-STSD}	<i>Coeficiente de Drag simulación túnel sin dispositivo.</i>
$C_{D-SCD\#}$	<i>Coeficiente de Drag simulación túnel con dispositivo (número de dispositivo).</i>
C_{P-STSD}	<i>Coeficiente por fuerzas de presión simulación túnel sin dispositivo.</i>
C_{V-STSD}	<i>Coeficiente por fuerzas viscosas simulación túnel sin dispositivo.</i>
C_{P-SSD}	<i>Coeficiente por fuerzas de presión simulación dominio literatura sin dispositivo.</i>
C_{V-SSD}	<i>Coeficiente por fuerzas viscosas simulación dominio literatura sin dispositivo.</i>
$C_{D-ECD\#}$	<i>Coeficiente de Drag experimental con dispositivo (número de dispositivo).</i>
$C_{P-SCD\#}$	<i>Coeficiente por fuerzas de presión simulación túnel con dispositivo (número de dispositivo).</i>
$C_{V-SCD\#}$	<i>Coeficiente por fuerzas viscosas simulación túnel con dispositivo (número de dispositivo).</i>
ρ	<i>Densidad.</i>
μ	<i>Viscosidad dinámica.</i>
C_f	<i>Espesor de la capa límite.</i>
k	<i>Energía cinética turbulenta.</i>
ε	<i>Tasa de disipación de energía cinética turbulenta.</i>
A	<i>Área frontal del modelo.</i>
v	<i>Velocidad.</i>
ξ	<i>Corrección por blockage ratio.</i>
H	<i>Altura (height).</i>
W	<i>Ancho (width).</i>
U	<i>Aguas arriba (upstream).</i>
D	<i>Aguas abajo (downstream).</i>

RESUMEN

La aerodinámica es uno de los pilares fundamentales en el diseño de cualquier vehículo que se desplace a través del aire, dado que la interacción entre el fluido y un cuerpo en movimiento genera una serie de fuerzas atribuidas principalmente a la forma, tamaño y superficie del cuerpo. Estas fuerzas al no ser controladas pueden llegar a afectar la seguridad o la eficiencia del vehículo y sus componentes.

Los buses de transporte intermunicipal son uno de los vehículos más afectados por la fuerza de resistencia aerodinámica (Drag), el cual puede ser reducido a través de diferentes métodos. En este trabajo se presenta el diseño de una serie dispositivos aerodinámicos que buscan reducir la resistencia al avance en un modelo a escala de un bus con carrocería similar al Marcopolo 1200 G7, alterando las características del flujo de aire sobre este.

Se realizó un estudio aerodinámico a partir de pruebas experimentales en túnel de viento subsónico y simulación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) en ANSYS-Fluent obteniendo el coeficiente de Drag e identificando el comportamiento del flujo. Todos los procedimientos y pruebas se ejecutaron en dos etapas, la primera con el modelo del bus original y una segunda con los dispositivos incorporados.

La primera etapa permitió establecer los datos de referencia y zonas del bus adecuadas para la incorporación de los dispositivos, a partir de la segunda serie de pruebas se realizó la comparación de los resultados obtenidos en la fase anterior, determinando la efectividad de cada dispositivo.

Se encontró experimentalmente que el dispositivo Laterales reduce la resistencia aerodinámica en un 20,37% con respecto a los datos obtenidos del bus sin alteraciones en su superficie, siendo el dispositivo más eficiente. A pesar de los prometedores resultados experimentales no fue posible validar computacionalmente la reducción del Coeficiente de Drag al implementar los dispositivos.

PALABRAS CLAVE: Resistencia aerodinámica (Drag), túnel de viento, CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), buses, aerodinámica exterior, Coeficiente de Drag.

ABSTRACT

Aerodynamics is one of the fundamental pillars in the design of any vehicle that travels through the air, given that the interaction between the fluid and the body in movement generate a number of forces attributed to the shape, size and the surface of the body. These forces not being controlled can affect the safety or the vehicle's efficiency and its components.

Intercity buses are one of the vehicles most affected by the Drag force, which one can be reduced through different methods. This document presents the design of a series of aerodynamic devices that seek to reduce the Drag resistance in a scale model of a bus with the bodywork similar to the Marcopolo 1200 G7, altering the characteristics of the air flow over it.

An aerodynamic study was carried out based on experimental tests in subsonic wind tunnel and CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation in ANSYS-Fluent obtaining the Drag Coefficient and identifying the flow behavior. All the procedures and tests were executed in two stages, the first with the model of the original bus and a second with the built-in devices.

The first stage allowed establishing the reference data and the zones of the bus suitable for the incorporation of the devices, from the second series of tests the comparison of the results obtained in the previous phase was made, determining the effectiveness of each device.

It was found experimentally that the Laterales device reduces the aerodynamic resistance by 20.37% with respect to the data obtained from the bus without alterations in its surface, being the device more efficient. Despite the promising experimental results, it was not possible to validate computationally the reducing of coefficient of drag the implement the devices.

KEY WORDS: Aerodynamic Drag (Drag), wind tunnel, CFD (Computational Fluids Dynamics), buses, exterior aerodynamics, Drag coefficient.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de disminuir el consumo energético en pro del medio ambiente, permitió identificar un grupo de vehículos terrestres de grandes dimensiones, los cuales requieren una potencia excesiva del motor para vencer las fuerzas que se oponen a su movimiento, de estas, según Hucho¹ la resistencia aerodinámica corresponde aproximadamente al 80% de la resistencia total que hace ineficientes a este tipo de vehículos en cuanto al consumo de combustible . A través de los años, estudios han demostrado que es posible mejorar el desempeño aerodinámico alterando algunas características de su geometría y por ende reducir el consumo de combustible.

Como Hucho menciona, con la necesidad de aumentar la capacidad de pasajeros se diseñaron vehículos alargados bajo los mismos principios aerodinámicos de los automóviles, en 1936 con la introducción del Tram-bus se dividen los buses de los autos debido al cambio del chasis y ubicación del motor, su característica aerodinámica más relevante fue el frente extremadamente redondeado, sin tomar en cuenta estudios realizados en 1930 por Pawlowski² donde identificó que no se requieren grandes radios en los bordes delanteros para una mínima resistencia. Lay³ en 1933 lo confirma con múltiples pruebas en carretera, sin embargo, esto no fue aplicado sino hasta 1969 en un modelo a escala de la Volskwagen LT y su posterior construcción en 1976.

En aviación una serie de superficies aerodinámicas permiten mejorar el desempeño de las aeronaves, aplicando estos conocimientos en vehículos terrestres se buscó diseñar dispositivos reductores de la resistencia aerodinámica en un bus intermunicipal. En este trabajo la investigación fue realizada con un modelo a escala de 1:25,79 determinando el coeficiente de Drag con y sin dispositivos.

Este estudio aerodinámico presenta dos grandes fases, la fase cualitativa relacionada a la visualización y determinación del comportamiento del flujo, que a su vez se sub divide en visualización superficial siendo ésta la etapa de observación sobre el cuerpo y visualización de campo del flujo, refiriéndose al aire alrededor del cuerpo bajo estudio; Por otro lado, la segunda fase es cuantitativa, en ella se

¹ HUCHO, Heinrinch. Aerodynamics of road vehicles. Inglaterra: Butterworth-Heinemann, 1987. p. 30-32.

² PAWLOWSKI. Citado por, HUCHO, Ibíd., p.30.

³ LAY. Citado por, HUCHO, Ibíd., p.30.

tomaron y analizaron datos de fuerzas y demás variables de interés del estudio. No obstante, ambas partes tienen una relación intrínseca debido a que el comportamiento del flujo es el que afecta las fuerzas aerodinámicas generadas.

Por medio de la experimentación y la simulación computacional, se llegó a la determinación y validación de los aspectos de interés, en donde todo giró en torno a la reducción de la resistencia aerodinámica mediante la alteración del flujo. La experimentación se llevó a cabo en un túnel de viento subsónico de baja velocidad de sección abierta a una velocidad máxima de 37.8 m/s. Se utilizaron técnicas de visualización con aceite y Dióxido de Titanio (TiO_2), tufts de algodón mercerizado y humo. Para la medición de fuerzas se acopló un dinamómetro digital y una interfaz que permitió obtener los datos. En cuanto a la simulación computacional se asumió que el flujo es simétrico por lo cual se simuló la mitad del modelo, se utilizaron las ecuaciones RANS con un modelo de turbulencia $K-\epsilon$ Realizable

Durante el desarrollo del estudio se presentaron una serie de limitaciones que impidieron obtener una mayor confiabilidad en los resultados, las condiciones atmosféricas y las características del túnel de viento, incluyendo la balanza aerodinámica, fueron factores determinantes en las pruebas experimentales, ya que por similitud dinámica, la velocidad que alcanzaría un bus real con dichos factores solo sería de 5.3 km/h; Además de esto el tiempo de simulación computacional se prolongó en gran medida debido a las capacidades del ordenador retrasando la ejecución del proyecto.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un dispositivo estructural con el fin de reducir la resistencia aerodinámica de un bus intermunicipal.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- *Determinar los puntos de separación del flujo sobre la superficie del modelo a escala del bus.*
- *Realizar un estudio aerodinámico del modelo a escala, implementando varios dispositivos estructurales para seleccionar el que tenga el mejor desempeño.*
- *Simular por medio de un software de dinámica de fluidos computacional el flujo de aire sobre el bus.*
- *Comparar los datos recolectados de resistencia al avance con respecto a una misma velocidad, entre el modelo con y sin el dispositivo.*

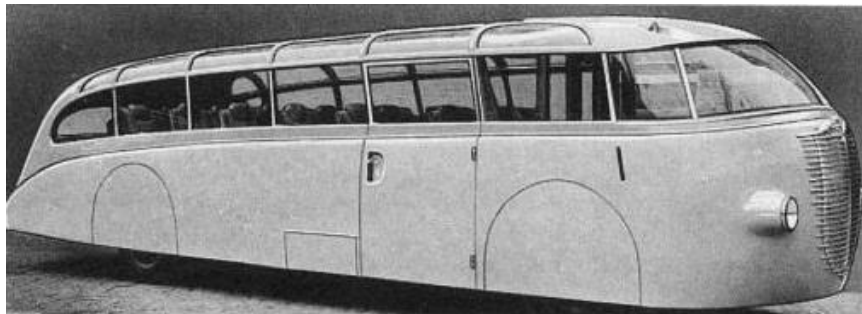
3. BUSES INTERMUNICIPALES

Los buses intermunicipales como son conocidos en la actualidad, han cambiado de forma debido a razones estéticas, de capacidad de carga o aumento en el desempeño, dichas modificaciones han permitido mejorar la calidad del servicio y la eficiencia del mismo. A continuación, se encuentra una breve historia de la evolución aerodinámica en buses desde su independencia de los automóviles, seguido del uso actual en Colombia, algunas características de las carrocerías modernas y su desempeño. Se realiza una descripción de los principios aerodinámicos en vehículos terrestres, algunos estudios y avances en la reducción del Drag.

3.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Para la década de los 30's surgió la necesidad de automóviles más veloces ya que en países potencia se comenzaba a construir autopistas de alta velocidad. Los primeros autobuses fueron diseñados como coches de pasajeros alargados. Se aplicaron los mismos principios de diseño aerodinámico, primero las líneas Jaray y después el Kamm-back. Con la introducción del 'Tram-bus' por Gaubschat⁴ en 1936, la forma de los autobuses se separó de los coches teniendo como característica principal un extremado redondeo en la parte frontal. Figura 1.

Figura 1. Tram-bus construido por Gaubshat, 1936

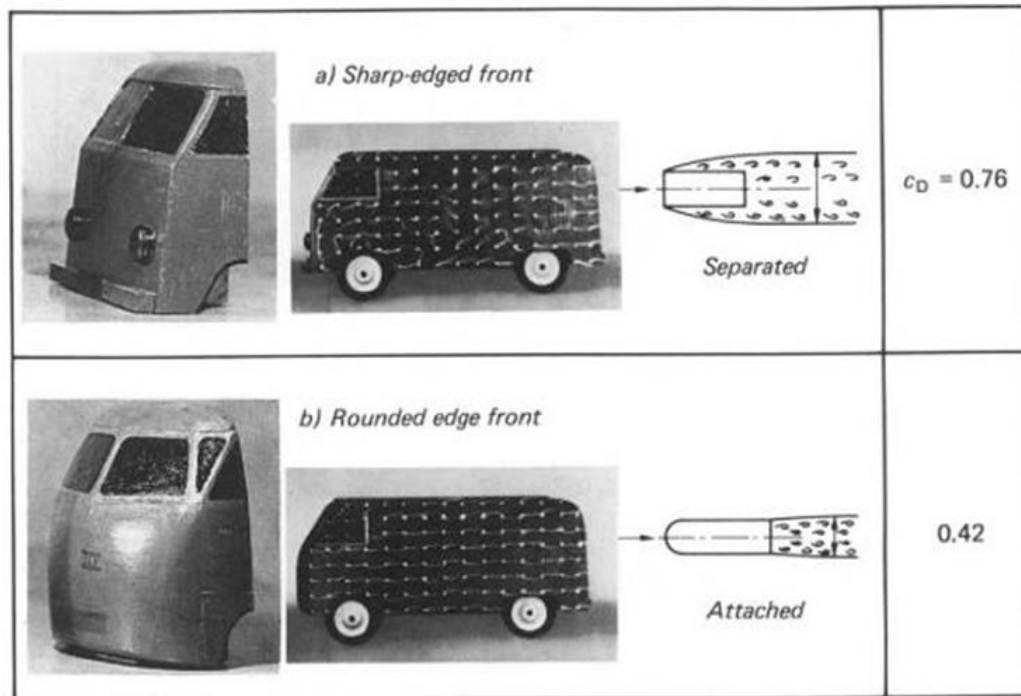


Fuente. HUCHO, Heinrich

Pawlowski en 1930 publicó datos sobre la influencia de superficies curvas en los principales bordes de ataque de los cuerpos rectangulares. De investigaciones se dedujo que pequeños radios son suficientes para llegar a la mínima resistencia de vehículos con forma de caja. Si bien el resultado fue confirmado por Lay en 1933 en pruebas de carretera, no se aplicó durante mucho tiempo.

⁴ GAUBSCHAT. Citado por, HUCHO, Ibíd., p.30.

Figura 2. Flujo alrededor de un modelo del primer Volkswagen van. 1951



Fuente. HUCHO, Heinrich

Un importante avance en la aerodinámica de los vehículos comerciales fue el diseño del frente a la primera furgoneta Volkswagen por Möller⁵ en 1951 Figura 2. Este trabajo permitió una reducción de la resistencia drásticamente. Aun así, para la primera furgoneta Volkswagen no se hizo uso de la obra de Pawlowski. La parte delantera de esta era mucho más redondeada de lo necesario para lograr un flujo adjunto y baja fricción. La primera furgoneta que fue diseñada de acuerdo a las ideas de Pawlowski fue la Volkswagen LT.

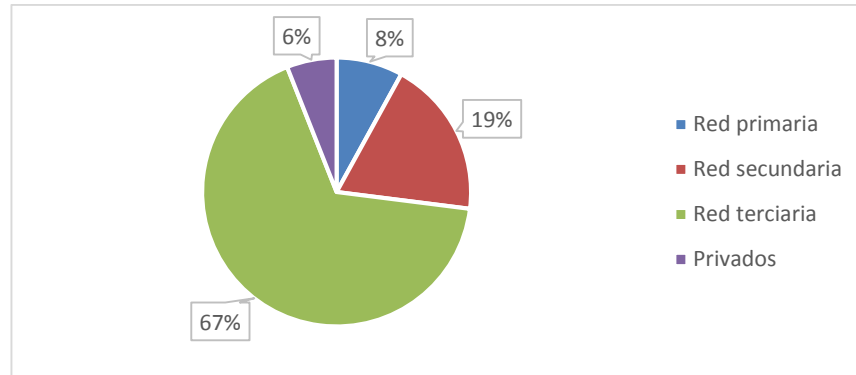
3.2 SITUACIÓN EN COLOMBIA

En un contexto general se puede vincular a la red nacional de carreteras colombianas, dicha red es regulada por el Ministerio de transporte mediante la gestión del Instituto nacional de vías (INVIAS). La red nacional de carreteras se constituye por tres grandes grupos, la red primaria constituida por grandes troncales, autopistas y corredores viales representando tan solo el 8% del total de la distribución vial, la red secundaria y terciaria corresponden a vías departamentales, municipales y veredales.

⁵ MÖLLER. Citado por, HUCHO, Heinrich. Aerodynamics of road vehicles. Inglaterra: Butterworth-Heinemann, 1987. p.32.

La red primaria tiene como finalidad la integración de las mayores zonas de producción y consumo del país, procurando disminuir tiempos de viaje. Estas carreteras deben soportar a diario miles de vehículos de transporte de pasajeros siendo éste el medio de transporte más usado en Colombia. Las principales compañías de transporte intermunicipal poseen una flota de buses que incluyen en su mayoría buses con carrocerías Marcopolo, Busscar y Scania ...Anexo A....

Gráfica 1. Distribución red vial.



Fuente. YEPES, Tito et.al

3.3 ESTUDIOS RECIENTES

La carrocería de un autobús es determinada por la capacidad de carga o por el número de pasajeros de acuerdo a su servicio, lo cual hace muy difícil variar la forma de estos. Por ello aparecen superficies o dispositivos aerodinámicos que intervienen en las fuerzas de arrastre, dichos elementos son la materia de interés en el comportamiento del flujo alrededor de los vehículos. Dispositivos capaces de redirigir el flujo de aire permiten reducir la resistencia aerodinámica de un cuerpo tipo bluff, diversas configuraciones como deflectores de flujo y cab-spoiler en camiones, causan una reducción significativa en el coeficiente de arrastre, otros dispositivos son montados en la parte delantera del remolque, con el fin de minimizar la formación de vórtices, reduciendo la resistencia total.

Un sistema de soplado neumático ubicado en la parte trasera y superior frontal de un tráiler ha sido utilizado en experimentos por Englar⁶, permitiendo una variación en la fuerza de apoyo del vehículo aumentando o disminuyendo la resistencia a la

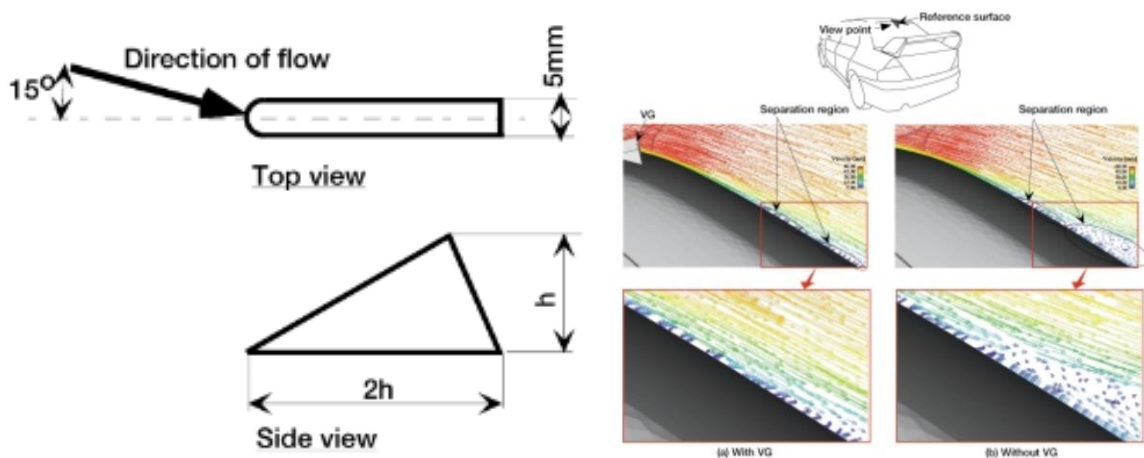
⁶ ENGLAR, R. J. (2000). Development of Pneumatic Aerodynamic Devices to Improve the Performance, Economics, and Safety of Heavy Vehicles. Citado por CARREGARI, André. Estudo do Escoamento de Ar sobre a Carroceria de um Ônibus usando um Programa de CFD e Comparação com Dados Experimentais. São Paulo: 2006. p. 10.

rodadura, el aumento de esta fuerza implicaría una reducción de la potencia del motor, economizando combustible. El sistema neumático controla la separación del flujo, reduciendo la presión en la superficie trasera, proporcionando una disminución en la resistencia aerodinámica.

Estudios computacionales en un vehículo de características similares a las de un autobús con un alerón ubicado en la parte trasera superior realizados por Kim⁷ en 2004 indican un cambio en la estela, la presencia del alerón provoca un desplazamiento del vórtice cerca de la superficie de la parte trasera del autobús. Hacer uso del alerón implicó reducción en el coeficiente de arrastre y un aumento de la sustentación negativa proporcionando estabilidad al vehículo a altas velocidades.

Por otra parte, se conoce de generadores de vórtices (VG) actualmente utilizados en aeronaves, automóviles y en tráiler de camiones. Como lo mencionan Koike, et al⁸, estos dispositivos son pequeñas superficies que generan vórtices justo en la ubicación de la separación de la capa límite, evitando que su desprendimiento sea en este punto al alterar el número de Reynolds crítico y reduciendo el tamaño de la estela turbulenta.

Figura 3. Generador de vórtices y vectores de velocidad alrededor del punto de separación



Fuente. KOIKE Masaru; NAGAYOSHI Tsunehisa y HAMAMOTO Naoki

⁷ KIM, M.-H. (2004). Numerical Study on the Wake Flow Characteristics and Drag Reduction of Large-sized Bus using Rear-spoiler. *International Journal Vehicle Design*, Vol. 34, n°. 3. Citado por CARREGARI, André. *Ibíd.*, p. 12.

⁸ KOIKE, Masaru; NAGAYOSHI, Tsunehisa y HAMAMOTO, Naoki. Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators. *Technical Review Mitsubishi Motors*: 2004. p. 11-16.

Numerosos diseños de dispositivos han sido desarrollados y probados en vehículos dando resultados favorables en cuanto a la reducción del Drag. Los dispositivos tienen diferentes formas y se ubican en diversas superficies de las carrocerías, buscando disminuir principalmente la resistencia generada por la presión, aunque algunos estudios sobre placas planas como el realizado por Kim et al⁹, en el 2016 sugieren que alteraciones de la superficie con elementos a nivel nano o microscópicos presentan buenas propiedades reduciendo hasta en un 36% la resistencia generada por agua.

3.4 AERODINÁMICA DE UN VEHÍCULO

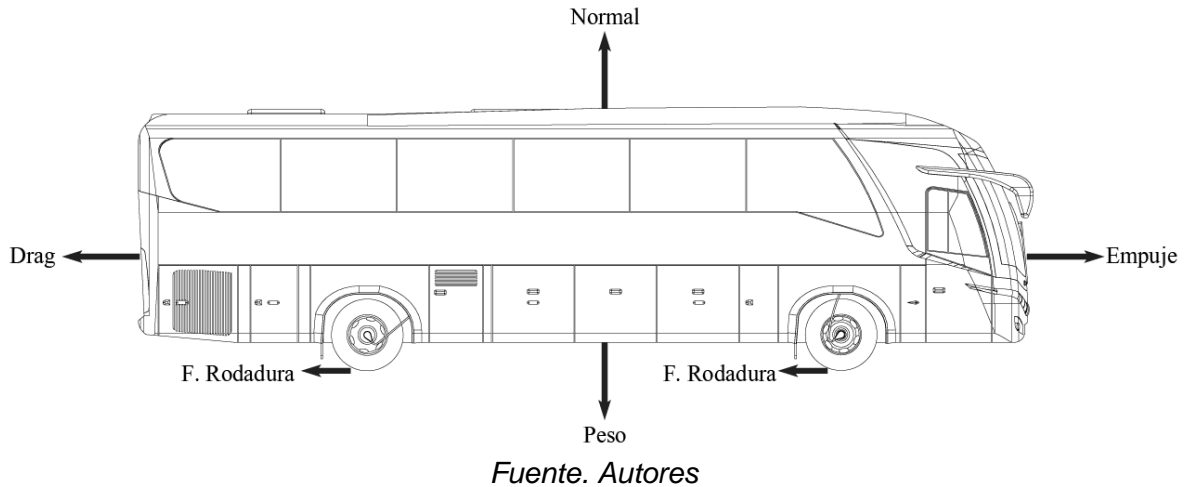
Todo cuerpo al moverse traslada el volumen de aire a su alrededor generando un vacío tras de él, que luego es ocupado por la corriente de aire desplazada, las fuerzas ocasionadas por este efecto aumentan exponencialmente con la velocidad, provocando que el Drag aerodinámico sea la principal fuerza de resistencia que debe vencer un cuerpo.

La variación en magnitud de las fuerzas aerodinámicas presentes en un vehículo en movimiento dependerán de las características del aire y de la carrocería de este, por lo que se debe considerar su forma, rugosidad superficial, área de contacto con el aire y la velocidad relativa entre el viento y el vehículo, esto genera una resultante de fuerzas en la superficie de la carrocería, compuesta de una fuerza de presión que actúa de forma normal a la superficie debido a la velocidad relativa y una fuerza de rozamiento tangente a la superficie debido a las propiedades viscosas del aire.

Al sumar todas las fuerzas de presión que intervienen sobre los puntos de la superficie se obtiene una fuerza neta total, actuando en el centro de presiones. Si se establece la dirección del movimiento y se descompone la fuerza neta en la dirección de este y en su perpendicular, se tiene que la primera de las componentes, llamada fuerza de arrastre o resistencia inducida se opone al avance del vehículo y la segunda, llamada fuerza de adherencia o sustentación, hace que el vehículo se adhiera o tenga tendencia a separarse del suelo. El avance de los vehículos también enfrenta una componente de la fuerza neta de rozamiento que al igual actúa en el centro de presiones.

⁹ TAEKYUNG, Kim y al., et. En: *Applied Surface Science*. Enero de 2016. Drag reduction using metallic engineered surfaces with highly ordered hierarchical topographies: nanostructures on micro-riblets. Seoul: no. 367. En: *Applied Surface Science*. Enero de 2016. p. 147-152.

Figura 4. Fuerzas que actúan sobre un Bus

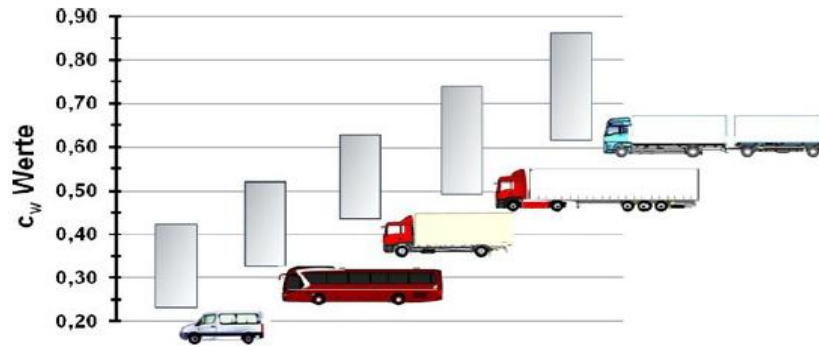


La corriente de aire sobre un vehículo en movimiento se clasifica en tres categorías: Flujo alrededor de la superficie, a través del cuerpo y en procesos internos de la maquinaria. Los procesos de flujo dentro del motor y la transmisión no están ligados con las dos primeras categorías, dado que éste no altera significativamente el campo de flujo alrededor del vehículo.

El flujo de aire sobre un vehículo es completamente tridimensional, en el cual se presentan capas límites turbulentas donde la separación y adhesión del flujo es común. Las grandes estelas turbulentas se forman en la parte trasera y en muchos casos contienen vórtices longitudinales. En la mayoría de los vehículos terrestres en movimiento la resistencia es principalmente generada por fuerzas de presión a diferencia de los aviones, los cuales por su alta velocidad producen grandes fuerzas viscosas.

Los objetivos de la aerodinámica varían de acuerdo al vehículo y a su utilidad, la baja fricción es conveniente para una disminución en el consumo de combustible, una sustentación negativa es decisiva en las curvas en autos de carrera pero no es de importancia para vehículos de gran tamaño, carros deportivos o familiares son sensibles a vientos cruzados mientras que vehículos pesados no los son, en cuanto al ruido que se pueda producir por el movimiento relativo entre el viento y el vehículo no es de importancia para autos de carreras pero debe ser bajo para carros y autobuses.

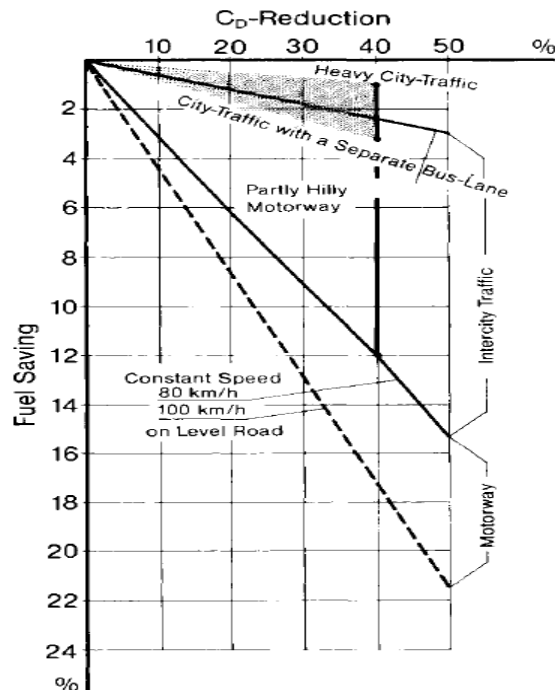
Figura 5. Coeficiente de Drag para diferentes tipos de vehículos



Fuente. HUCHO, Heinrich

La resistencia aerodinámica, así como los demás componentes de fuerza y momentos, aumenta con el cuadrado de la velocidad del vehículo. “Según estudios experimentales, en un coche europeo de tamaño mediano, la resistencia aerodinámica representa casi el 80 por ciento de la resistencia total en una carretera a una velocidad de 100 km/h”¹⁰. Este es por lo tanto el punto que se debe trabajar para mejorar la economía mediante la reducción de la resistencia aerodinámica.

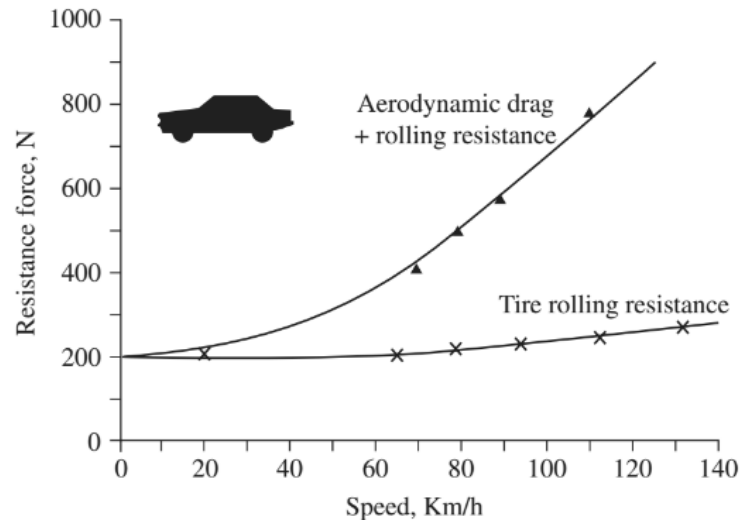
Gráfica 2. Porcentaje de reducción de combustible vs reducción C_D en buses



Fuente. HUCHO, Heinrich

¹⁰ HUCHO. Op. cit., p. 2.

Gráfica 3. Comparación entre Drag aerodinámico y resistencia por rodadura



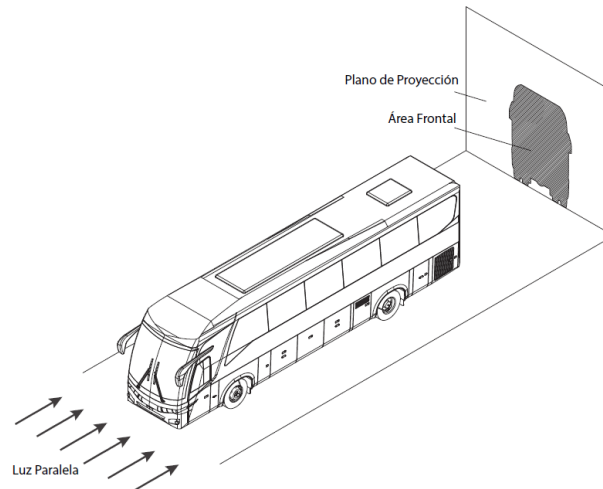
Fuente. KATZH, Joseph

La expresión de Drag está definida así:

$$D = C_D A \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \quad (1)$$

Donde C_D es el coeficiente de Drag adimensional el cual determina la capacidad aerodinámica del vehículo junto a su velocidad, A es el área frontal proyectada por este ...Figura 4... , y ρ es la densidad del aire circundante. El coeficiente C_D es la expresión de la resistencia que ofrece un cuerpo a moverse dentro de un fluido por razón de su forma.

Figura 6. Definición del área frontal A de un vehículo



Fuente. Autores

3.5 EXPERIMENTACIÓN EN TÚNEL DE VIENTO

El túnel de viento es una herramienta que permite la aceleración del flujo de aire con el fin de estudiar su comportamiento sobre un cuerpo sólido. Existen dos tipos básicos de túnel de viento, circuito abierto y circuito cerrado, los cuales poseen alguna de las siguientes configuraciones de la sección de pruebas, abierta o cerrada. “El aire que fluye a través de un túnel de circuito abierto sigue una trayectoria esencialmente recta desde la entrada a través de una contracción hasta la sección de prueba, seguida por un difusor, una sección de ventilador y un escape del aire, mientras que el flujo de aire en un túnel de circuito cerrado recircula con poco o ningún intercambio de aire con el exterior”¹¹. Una sección de pruebas cerrada hace referencia a la presencia de paredes que aíslan el aire en forma de un ducto a diferencia de una sección de pruebas abierta la cual carece de cualquier tipo de muro.

Las características del tipo de túnel y sección de pruebas son de importancia, ya que estos parámetros definen la corrección de los resultados por la relación de bloqueo. En condiciones reales un vehículo tiene a su alrededor un volumen de aire que se puede considerar ilimitado el cual es libre de expandirse, al estar confinado entre las paredes de la sección de pruebas de un túnel de viento se reduce el área a través del cual el aire debe fluir, alterando la velocidad y el comportamiento del flujo, esto se conoce como la relación de bloqueo o Blockage ratio y se define para cuerpos tipo bluff como:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{4} \times \frac{\text{Area frontal del modelo}}{\text{Area transversal de la seccion de pruebas}} \quad (2)$$

Un tema de discusión en las investigaciones en túnel de viento de modelos a escala de autobuses ha sido el control del efecto suelo, ya que la capa límite producida por el suelo de la zona de pruebas puede variar el comportamiento del flujo de aire en los modelos a ser probados.

Existen diferentes técnicas para reducir la capa límite del suelo, Barlow et al¹², expone algunos métodos de representación de este tales como imagen espejo, el cual consta en la fijación de dos modelos idénticos enfrentados por su parte inferior,

¹¹ BARLOW, Jewel y RAE, William y POPE, Alan. 1999. Low-Speed Wind Tunnel Testing. Toronto: JOHN WILEY & SONS, INC, 1999. p. 25.

¹² BARLOW, Jewel. *Ibíd.* p.

suelo móvil en el que se acopla una banda transportadora al túnel de viento buscando que su velocidad sea la misma del aire en la sección de pruebas, soplo de aire tangencial que inyecta fluido paralelamente a la corriente libre a través de un espacio muy pequeño entre muchos otros. Sin embargo, la adición de algunos de estos elementos requiere una sección de pruebas de grandes dimensiones para evitar efectos de bloqueo.

Además de la recolección de datos, un túnel de viento permite reconocer algunas características de comportamiento del flujo mediante diferentes técnicas de visualización. La observación del flujo de aire en el túnel de viento puede realizarse desde dos perspectivas para captar los fenómenos presentes en un modelo, la primera es la visualización del flujo sobre el cuerpo, la cual se realiza en algunos casos con hilos, aceites o arcilla china, la segunda opción es la visualización del campo de flujo alrededor del cuerpo para lo cual se usa humo, burbujas y mallas de hilo.

La visualización del flujo de campo permite identificar el comportamiento del flujo alrededor del cuerpo, siendo las estelas turbulentas y vórtices los fenómenos más evidentes, en cuanto a la visualización del flujo sobre la superficie siendo cada vez más usada en las investigaciones en túneles de viento permite identificar:

- *Puntos de estancamiento*
- *Líneas de separación*
- *Localización de la transición de capa límite*
- *Características de inestabilidad*
- *Extensión de zonas de separación*
- *Puntos críticos y sus localizaciones*

3.6 DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Las tecnologías digitales se han incorporado en la industria automotriz minimizando el tiempo de desarrollo de los proyectos. La Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics) proporciona a los ingenieros una mejor comprensión de la mecánica de fluidos, perfeccionando la carrocería y rendimiento de los vehículos. Existen diferentes modelos matemáticos para representar el flujo dependiendo el tipo y las condiciones en las que se encuentre, se dividen en grandes grupos de modelos que funcionan como una aproximación computacional, estos son DNS, LES y RANS.

DNS (Direct Numerical Simulation) brinda una solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes sin la necesidad de un modelo de turbulencia, sin embargo, su costo computacional es muy elevado; LES (Large Eddy Simulation) resuelve un filtro de las ecuaciones dando una estructura turbulenta precisa dentro de unos límites impuestos en su código, aunque es poco práctico para simulaciones aplicadas debido a la inconsistencia con la naturaleza caótica de la turbulencia, además los recursos computacionales necesarios son mucho mayores que los DNS para la mayoría de aplicaciones; por último RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) presenta una serie de modelos siendo los más ampliamente usados debido a su bajo costo computacional resolviendo un promedio del tiempo de las ecuaciones de Navier-Stokes.¹³

Ecuación de continuidad:

$$\rho + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{array}{l} \text{Tasa de aumento de masa} \\ \text{en un elemento de fluido} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Tasa neta de flujo de masa} \\ \text{dentro del elemento de fluido} \end{array}$$

Conservación del Momentum:

$$\begin{array}{l} \text{Dirección X } \rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \\ \text{Dirección Y } \rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \\ \text{Dirección Z } \rho \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \end{array} \quad (4)$$

$$\begin{array}{l} \text{Tasa de incremento del Momentum} \\ \text{de una partícula de Fluido} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Suma de las fuerzas sobre} \\ \text{la partícula de fluido} \end{array}$$

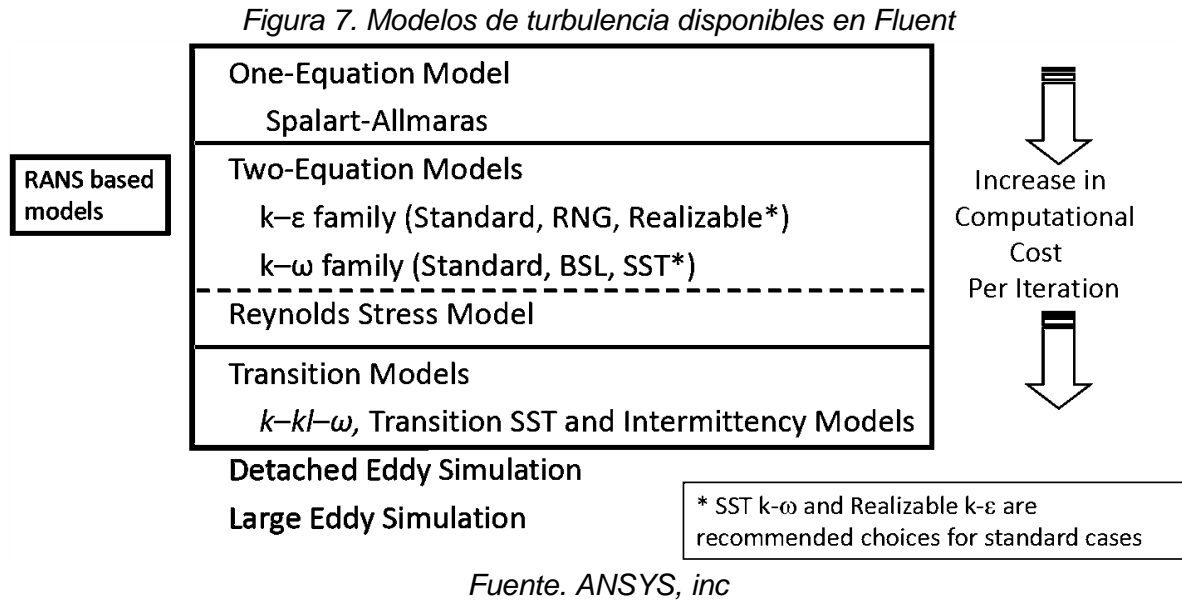
Conservación de la energía:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial E}{\partial t} = & -\text{div}(pu) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \\ & \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \end{aligned} \quad (5)$$

¹³ ANSYS, Inc. 2015. Lecture 7: Turbulence Modeling. [Diapositivas]. s.l. : ANSYS, Inc, 2015.

$$\begin{array}{ccccc} \text{Tasa de incremento de la} & & \text{Tasa Neta de calor} & & \text{Tasa neta de trabajo} \\ \text{energía de una partícula de} & = & \text{agregado a la partícula de} & + & \text{realizado sobre la partícula} \\ \text{fluido} & & \text{fluido} & & \text{de fluido} \end{array}$$

Asumiendo que la temperatura es constante no es necesario resolver la ecuación de la energía y teniendo en cuenta que el flujo es incompresible las ecuaciones de energía y momento son simplificadas.



El modelo Realizable k-ε siendo el de interés para este trabajo, según Versteeg y Malasakera¹⁴ es uno de los más sofisticados y generales, es ideal para flujos turbulentos, vórtices y zonas de transición. Su enfoque son los mecanismos que afectan la energía cinética turbulenta, a través de la producción de energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta ε expresadas como se observa a continuación:

$$k \quad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \left[\text{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\epsilon \quad \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon U) = \left[\text{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \text{grad } \epsilon \right] \text{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7)$$

¹⁴ VERSTEEG, H K y MALALASAKERA, W. 1995. *An introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method*. New York: Longman scientific & technical, 1995. p. 63-72.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Tasa de} & & \text{Transporte de} & & \text{Transporte de} & & \text{Tasa de} \\ \text{cambio} & + & k \text{ o } \varepsilon & \text{por} & = & k \text{ o } \varepsilon & \text{por} \\ \text{de } k \text{ o } \varepsilon & & \text{convección} & & \text{difusión} & & \text{producción de} \\ & & & & & & k \text{ o } \varepsilon \\ & & & & & & \text{Tasa de} \\ & & & & & & \text{destrucción} \\ & & & & & & \text{de } k \text{ o } \varepsilon \end{array}$$

Viscosidad turbulenta

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

El proceso de simulación CFD contiene tres grandes pasos como lo definen Versteeg y Malasakera¹⁵, estos a nivel general consisten en:

- El pre-proceso, en el cual se define la geometría que presenta un dominio computacional, las condiciones de frontera, la malla con un número de elementos que discretizan el modelo y la definición de las propiedades del fluido.
- La solución, en donde se desarrollan de forma iterativa las ecuaciones del modelo definido en forma algebraica para representar el flujo, obteniendo resultados visuales y numéricos.
- El post-proceso, en donde se analizan los resultados visuales y numéricos.

¹⁵ VERSTEEG, H K y MALALASAKERA, W. *Ibíd.* p. 2-5.

4. FABRICACIÓN DEL MODELO A ESCALA

En este capítulo se encuentra el proceso que se llevó a cabo para la elección del modelo del bus, el escaneo, el post-procesamiento de la nube de puntos, la obtención del CAD, la elaboración del modelo a escala impreso en 3D y los acabados superficiales. Los procesos que requirieron máquinas de modelado, insumos y otras herramientas fueron realizados en las instalaciones de la Red Tecnoparque SENA nodo Bogotá.

4.1 ELECCIÓN DEL BUS INTERMUNICIPAL

Para llevar a cabo la elección del modelo en el cual se enfocaría el estudio, se optó por realizar la búsqueda de empresas que recorrieran las principales carreteras del país en donde les fuera posible a los buses transitar a alta velocidad, del mismo modo se realizó la búsqueda de las flotas con las que cuentan dichas compañías y se buscó establecer contacto con estas por vía escrita, telefónica y asistiendo a las instalaciones de algunas empresas del sector.

Con los datos recolectados se elaboró una tabla que presenta algunos de los modelos disponibles en cada compañía (Anexo 1). Gracias a ésta se identificaron los modelos con mayor presencia en las empresas, los cuales son Marcopolo Paradiso 1200 G6 y G7. Teniendo en cuenta que el modelo G7 recientemente entró al mercado y estará en servicio por un tiempo más prolongado se seleccionó como punto de partida del proyecto.



4.2 ESCANEO 3D

El equipo de escaneo se obtuvo gracias a la postulación del proyecto a la Red Tecnoparque SENA Nodo Bogotá, en donde un grupo de tutores compuesto por ingenieros y diseñadores industriales evaluó el proyecto y sirvieron como asesores durante algunas etapas de su desarrollo. Se aprobó la vinculación del proyecto con la limitación de escanear un bus a escala debido a restricciones de la institución y dificultades logísticas para escanear un bus real, por este motivo se adquirió un modelo a escala que se asemejara lo más posible al modelo real y que permitiera obtener el CAD que posteriormente sería modificado.

El proceso de escaneado inició con la calibración del Metra Scan, el cual cuenta con los elementos mostrados en la Tabla 2. Mediante una barra con puntos de referencia

(Targets) identificados por el C-Track 780, se calibró el posicionamiento espacial para la ubicación del modelo, alto, ancho y profundo. A continuación, se realizó un soporte con tubos de aluminio, que permitió sostener el modelo y acceder a todas sus caras, esto con el fin de garantizar que durante el escaneo el bus no se moviera en ningún momento, ya que de ser así se distorsionaría la información captada por el equipo.

Tabla 1. Componentes del Metra Scan 3D

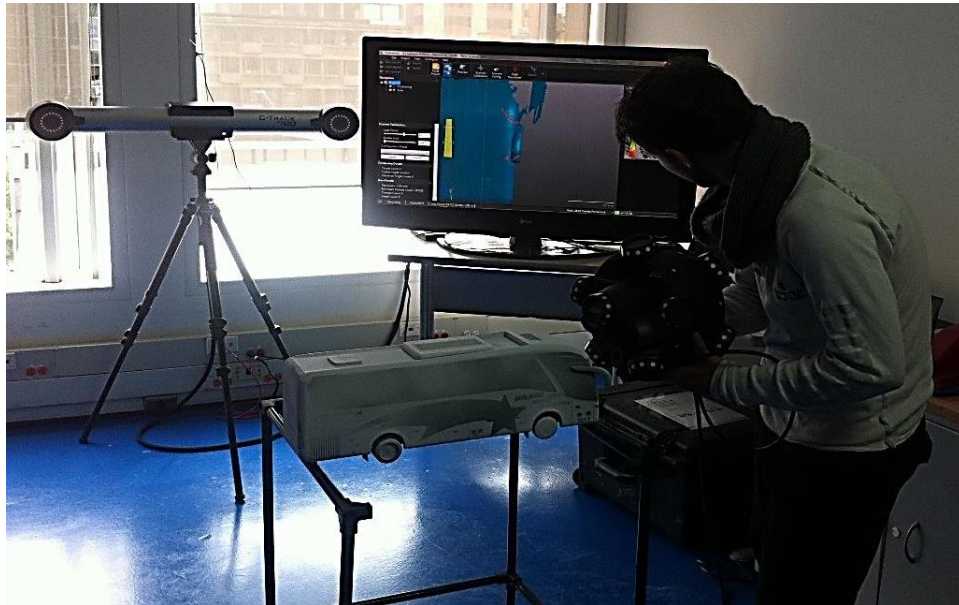
COMPONENTE		DESCRIPCIÓN
C-TRACK 780		<i>El sensor C-Track proporciona funciones de inspección de sondeo y medición dinámica. Está equipado con sistemas ópticos de alta calidad y una iluminación especial, que le permite medir todos los reflectores dentro de su área de funcionamiento.</i>
ESCÁNER 3D ÓPTICO		<i>Escáner óptico MetraSCAN 3D de mano proporciona funciones de digitalización y sondeo de piezas con alta precisión.</i>
CONTROLADOR DEL C-TRACK		<i>Interfaz del C-Track 780 que permite la conexión con el computador que posee el software.</i>
SOFTWARE VXELEMENTS MÓDULO VXSCAN		<i>Software especializado en digitalizaciones en 3D, con una variedad de herramientas que le otorgan al usuario una gran accesibilidad a la pieza escaneada.</i>

Fuente: Autores

Fue necesario aplicar una sustancia sobre el modelo que mejorara la precisión del escaneo, evitara la reflexión de la señal del sensor y la generación de ruido; para esto fue usado revelador de soldadura SKD-S2 en aerosol. El proceso de escaneo

se realizó mediante barridos con el sensor óptico sobre la superficie del modelo a una distancia de aproximadamente 300 mm, esto requirió detener el sistema y salvar el archivo constantemente debido a la carga computacional. Al completar la lectura de todo el modelo, el último paso en el software es la eliminación de zonas inexistentes (ruido) en la superficie del bus y cerrar contornos abiertos.

Figura 8. Escaneo del modelo



Fuente. Autores

4.3 POS-PROCESAMIENTO DE LA NUBE DE PUNTOS Y OBTENCIÓN DEL CAD

La nube de puntos generada durante el escaneo requiere un proceso de reconstrucción para convertirla en un modelo poligonal 3D que permita ser modificado en un software CAD. Para este proceso se tuvieron en cuenta distintas aplicaciones que cumplen con esta función, las cuales son Mesh Mixer, Rapidform y Solidworks.

El primer software fue Mesh Mixer una herramienta definitiva para mallas y mezclas que permite esculpir y pintar diseños en 3D. Este software desarrollado por Autodesk permitió exportar un archivo a Solid Edge sin mayores prestaciones, aunque únicamente permitió la visualización del modelo sin la posibilidad de realizar alguna modificación.

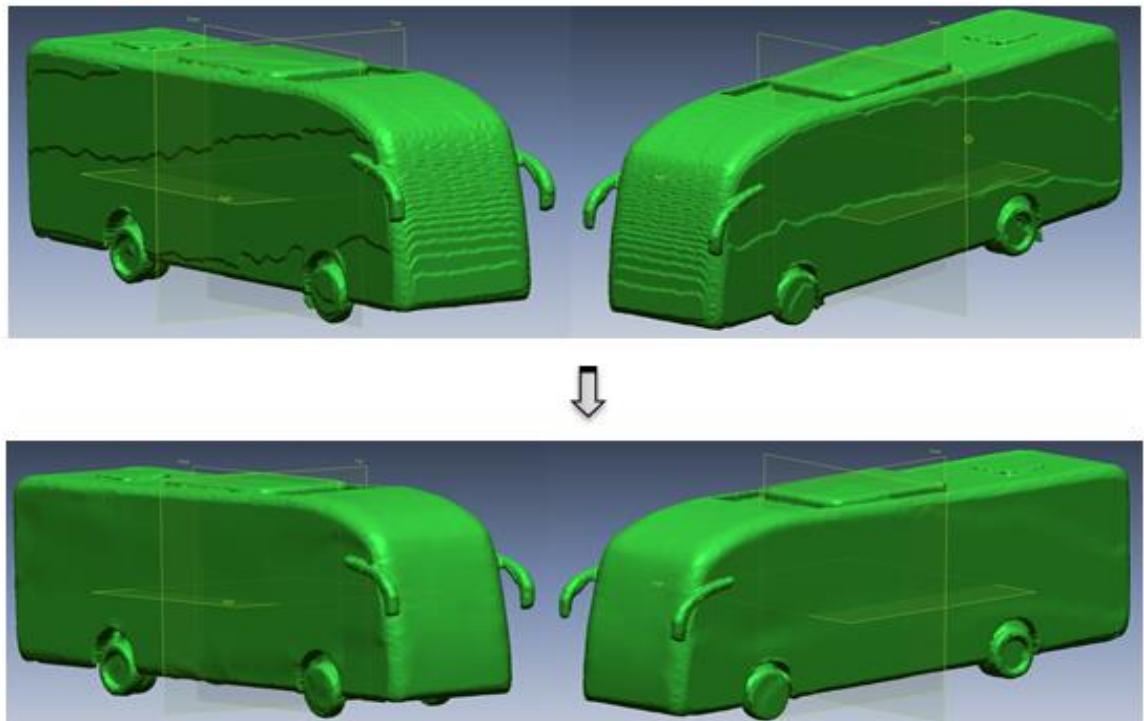
El segundo software probado para la reconstrucción fue Solid Works módulo ScanTo3D, este complemento permite importar, analizar, manipular y convertir

nubes de puntos en sólidos y superficies en 3D. El proceso realizado en este software fue complejo debido a que demanda alto conocimiento de las herramientas con las que cuenta, por lo tanto, se continuó con la verificación de la siguiente aplicación.

Finalmente se probó Rapidform el cual permitió mejorar la nube de puntos, sellar agujeros y crear superficies más finas con métodos más sencillos. Éste Software fue elegido asumiendo que presenta la desventaja de generación de archivos pesados que exigen mayor capacidad de la máquina.

Para llevar a cabo este proceso fue necesario realizar un número de pruebas considerable, ya que se presentaron errores por sobrecarga de la memoria del equipo o por superficies incompletas que no permitían generar el sólido. Durante el proceso se debieron realizar varios pasos de refinamiento ya que la nube de puntos inicial, presentaba capas inexistentes en la superficie del modelo ...Figura 9..., se utilizaron las herramientas poly-face, cierre de huecos y optimización con el fin de obtener la mejor calidad superficial del modelo.

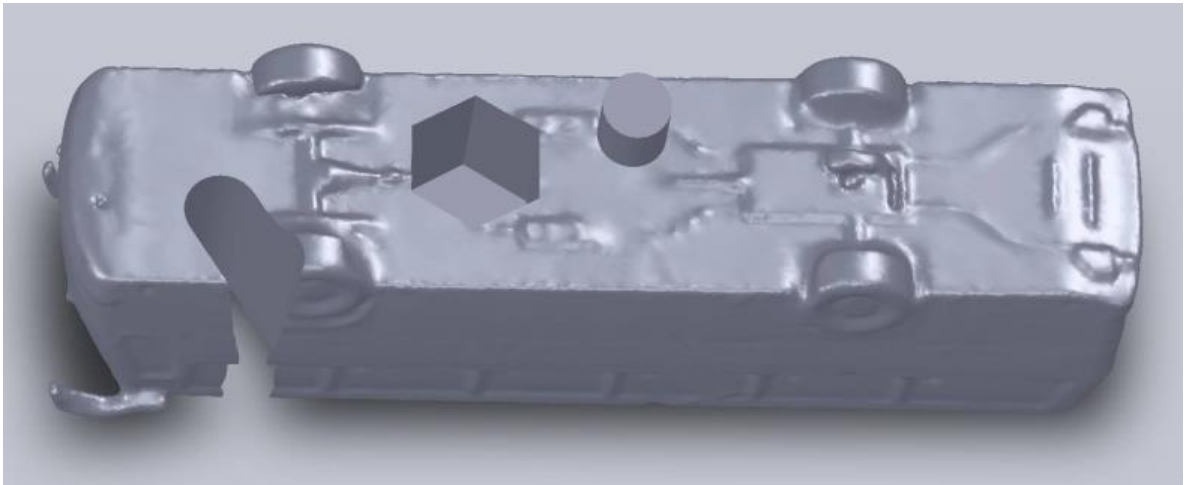
Figura 9. Post-procesamiento de la nube de puntos



Fuente. Autores

La comprobación de que realmente se obtuvo un sólido se hizo guardando el archivo en diferentes formatos, dentro de estos STL, IGS y RPT los cuales permitieron la lectura exitosa en sus respectivos programas, adicional a esto en Solid Works se realizaron una serie modificaciones que garantizaron el éxito del proceso ...Figura 10....

Figura 10. Comprobación de modificación del solido



Fuente. Autores

En la Tabla 3 se muestran las características del archivo terminado.

Tabla 2. Características del solido Post-procesado

CARACTERÍSTICA	VALOR
<i>Número de Superficies</i>	<i>4.500</i>
<i>Número de Poly-Face</i>	<i>294.740</i>
<i>Peso del archivo IGS</i>	<i>80.940 KB</i>
<i>Peso de archivo PAR</i>	<i>39.187 KB</i>
<i>Memoria RAM consumida</i>	<i>1.750 MB</i>

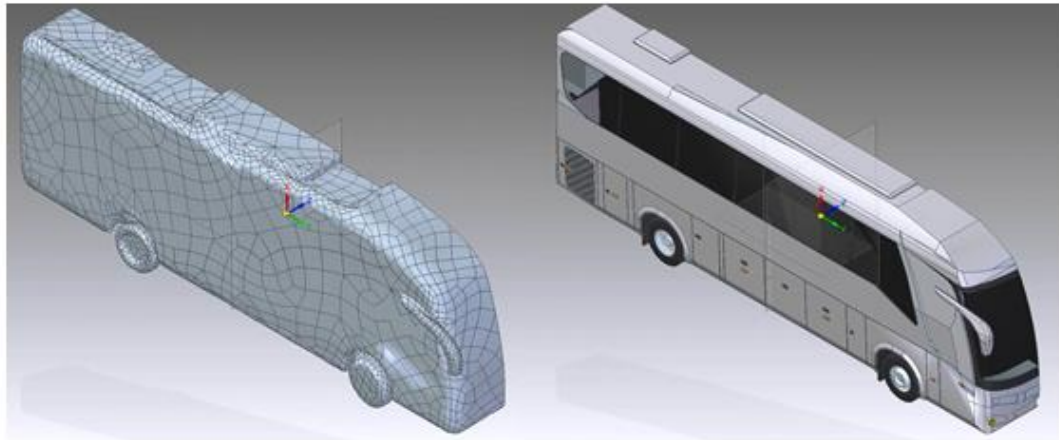
Fuente. Autores

El proceso continuó con el modelado del CAD usando Solid Edge y Solid Works, allí se buscó corregir el sólido para que se asemejara en mayor proporción al bus real, se presentaron varias complicaciones debido a las numerosas superficies, desniveles e imperfecciones generadas durante el escaneo.

Como primer paso se aseguró que el sólido importado estuviera paralelo a uno de sus ejes, logrando que las cuatro ruedas se asentaran sobre el suelo garantizando que el modelo no se encontrara con ningún grado de inclinación y asumiendo que el modelo es simétrico, el CAD fue dividido a través de su eje longitudinal, simplificando trabajo y coste computacional.

Se obtuvieron los planos correspondientes al modelo de un solo troque ...Anexo B... de los cuales se extrajeron los detalles y sus dimensiones, estos fueron escalados al tamaño del modelo para realizar las operaciones de acabados. Al terminar esta etapa se escaló el modelo a 1: 25,79 definido por cálculos de similitud dinámica y Blockage ratio que es de 0,0155 con respecto al túnel de viento...Anexo C....

Figura 11. Proceso de modelado CAD

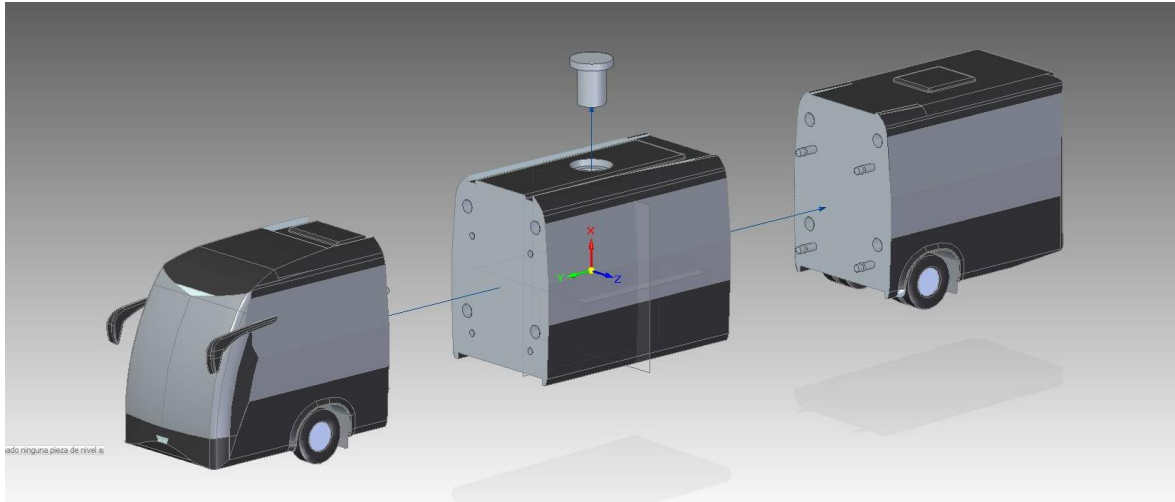


Fuente. Autores

4.4 ELABORACIÓN DEL MODELO


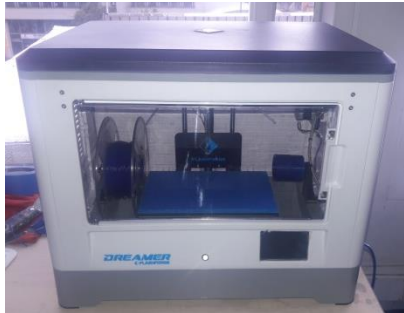
El modelo físico se obtuvo a través de impresión 3D, debido a que este proceso fue llevado en paralelo con la simulación computacional, se identificaron diferentes zonas que complicaron la simulación y exigieron la remoción de aquellos detalles que no alteraran significativamente la aerodinámica del vehículo. Al obtener el CAD definitivo fue necesario realizar una división del bus en tres partes ...Figura 12..., esto debido a que las dimensiones máximas de la bandeja de fabricación impidieron la impresión del modelo completo ya que su longitud es de 51 cm aproximadamente ...Tabla 4..., adicionalmente se diseñó un sistema de sujeción a la balanza aerodinámica que consta de un agujero pasante por la mitad del modelo y un tapón en la parte superior del mismo.

Figura 12. Separación de las piezas del bus



Fuente. Autores

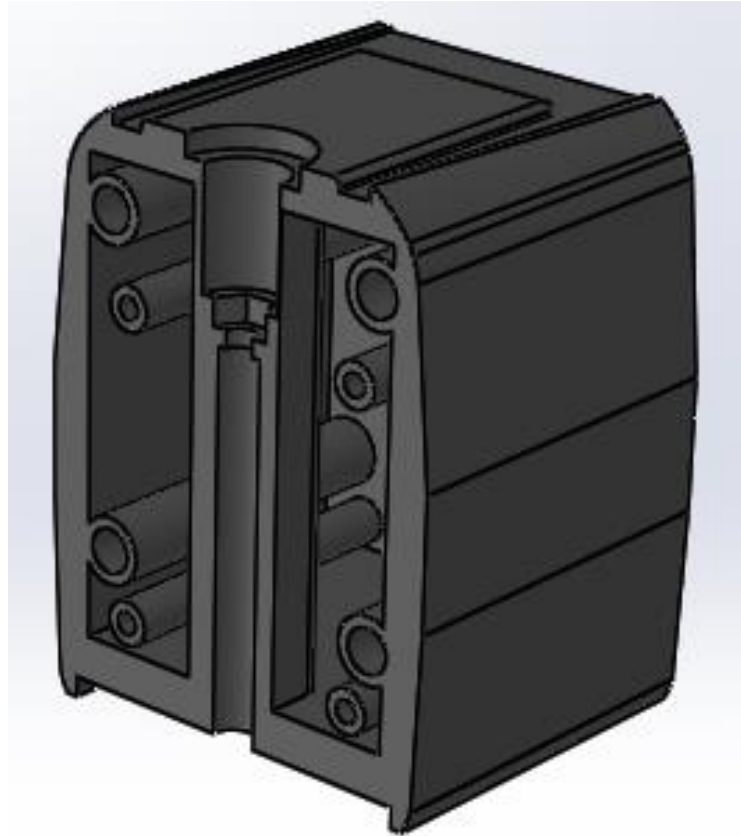
Tabla 3. Herramientas de impresión 3D

Recurso	Visualización	Especificaciones	Descripción
Impresora 3D		Fabricante: Stratasys Serie: Fortus 250 mc Material: ABSplus-P430 Bandeja de fabricación (XYZ): 250 x 250 x 250 mm Software: catalyst	Máquina de impresión en tres dimensiones, creando piezas volumétricas a partir de un diseño hecho por ordenador.
		Fabricante: Flashforge Serie: Dreamer dual extrusión 3D Material: ABSplus-P430 Bandeja de fabricación (XYZ): 231 x 140 x 150 mm Software: Flashprint	

Fuente. Autores

Al realizar la división fue necesario diseñar el sistema de sujeción entre las piezas, para esto se diseñó un método de unión que consta de pines y largueros longitudinales ...Figura 13.... Por último, se realizó un vaciado de las partes con el fin de ahorrar material y tiempo, se dejó un espesor para imprimir la capa exterior sólida y otra capa impresa en honeycomb.

Figura 13. Vaciado de la sección intermedia del modelo



Fuente. Autores

Las impresiones fueron realizadas en ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), fue necesario sumergirlas en un tanque con Hidroxido de Sodio R35 por un par de días para remover el material de soporte que se alojaba en el interior de cada una de las partes. Se continuó con el acabado de la superficie con la ayuda de lijas, motortool y caseína, posteriormente usando cianocrilato y cloruro de metileno se unieron las 3 partes, los espejos y el tapón al cual le fue insertado una tuerca que permitió asegurar el soporte para el túnel de viento, ...Figura 14..., adicional a esto se corrigieron desniveles y se pintó con aerosol negro mate para facilitar la visualización en las pruebas del túnel de viento. ...Figura 15....

Figura 14. Acabados del modelo



Fuente. Autores

Figura 15. Modelo finalizado



Fuente. Autores

5. EXPERIMENTACIÓN EN TÚNEL DE VIENTO

En este capítulo se presenta el desarrollo de las pruebas experimentales de visualización y toma de datos de resistencia aerodinámica en el túnel de viento subsónico de baja velocidad de la Fundación Universitaria Los Libertadores y las herramientas implementadas para lograr dichas actividades. Estas pruebas fueron realizadas a un promedio de presión y temperatura de 74800 Pa y 19.56 °C respectivamente y a máximas RPM del túnel de viento el cual proporcione una velocidad de corriente libre de 37.8 m/s.

5.1 PRUEBAS DE VISUALIZACIÓN

Esta etapa experimental se orientó a la determinación del comportamiento del flujo con el fin de identificar características y los puntos críticos en los cuales se enfocaría el proceso de diseño. Inicialmente se realizaron pruebas de visualización de flujo de campo con humo, las cuales no permitieron caracterizar el flujo de la forma esperada debido a la baja densidad del humo y a la restricción de la velocidad para esta prueba, ya que a alta velocidad el humo se desvanece completamente en el aire, por lo cual se operó un flujo laminar que no permitió identificar los fenómenos presentes por la interacción del aire con el modelo. ...Figura 16....

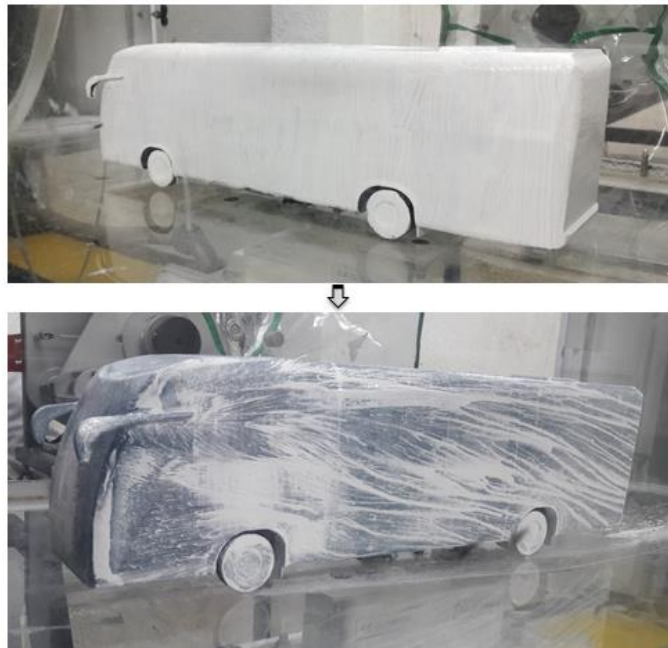
Figura 16. Prueba de visualización de campo con humo



Fuente. Autores

La visualización de flujo superficial se llevó a cabo con dos métodos diferentes recomendados por Barlow et al¹⁶. El primer método fue la visualización con aceite aplicado en la superficie del bus, el cual fue sometido a la máxima velocidad del aire proporcionada por el túnel de viento durante diez minutos para que se revelara completamente el patrón formado por el flujo, para esto se utilizó una mezcla de aceite de linaza y Dioxido de Titanio (TiO_2), un elemento en polvo usado para pigmentar el aceite y que tiene la propiedad de reflejar casi toda la radiación lumínica que impacta sobre él. Cabe resaltar que esta prueba depende de la calidad de la mezcla, ya que según su viscosidad se logran visualizar trazos de interés que representan vórtices, recirculación, separación de la capa límite, burbujas de estelas turbulentas y puntos de estancamiento ...Figura 17....

Figura 17. Prueba de visualización superficial con aceite y TiO_2

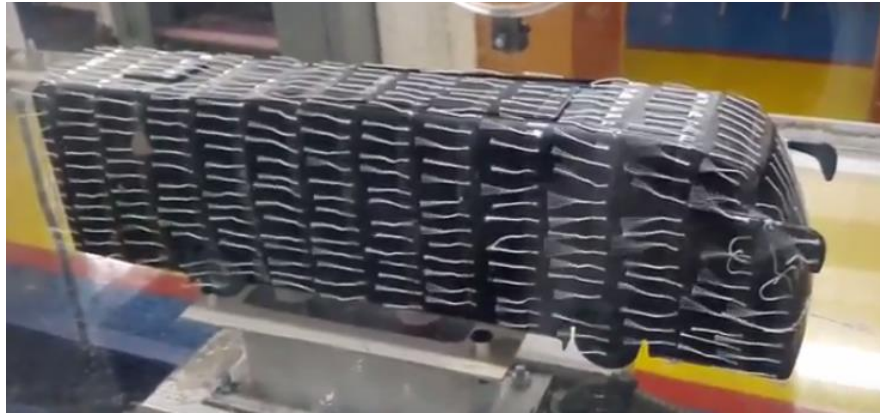


Fuente. Autores

El segundo método de visualización superficial se dio por el uso de tufts o hilos de algodón mercerizado adheridos al modelo, estos tuvieron una longitud de tres centímetros (3 cm) y se ubicaron uno tras otro a una distancia de medio centímetro y paralelamente a un centímetro buscando captar la mayor cantidad de detalles. Esta prueba permitió identificar la dirección del flujo y zonas de turbulencia complementando la información lograda con los otros métodos de visualización ...Figura 18....

¹⁶ BARLOW, Jewel. Op cit. p. 188-216.

Figura 18. Visualización superficial con el uso de hilos (tufts)



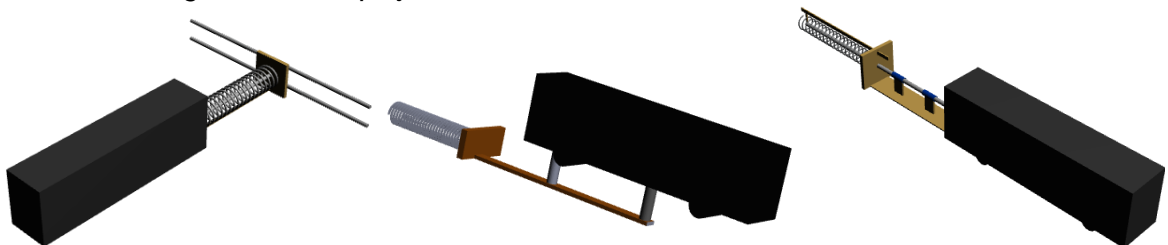
Fuente. Autores

5.2 PRUEBAS DE FUERZA

Esta fase se orientó exclusivamente a la medición experimental de la fuerza de resistencia aerodinámica (Drag) debido a que fue la variable esencial de la investigación; cabe destacar que la planeación se vio afectada a causa de que la balanza aerodinámica del túnel de viento se encontró fuera de servicio, lo que instó a plantear alternativas para la medición de la fuerza en la sección de pruebas, enfocándose en un sistema que en lo posible no perturbara el flujo y lograra la mejor precisión de los datos.

El proceso inició tomando como base la ley de Hooke que a través de la deformación de un resorte y conociendo la constante del mismo, permite determinar la fuerza aplicada. Se realizaron algunos diseños que incluyeron el método de acople al modelo y a las paredes del túnel con el fin de asegurar el sistema a la sección de pruebas, sin embargo, se optó por continuar con otro método menos complejo debido a que estos diseños ocupaban mucho espacio y podrían alterar el flujo de forma considerable ...Figura 19....

Figura 19. Bosquejos iniciales del sistema de medición de fuerza

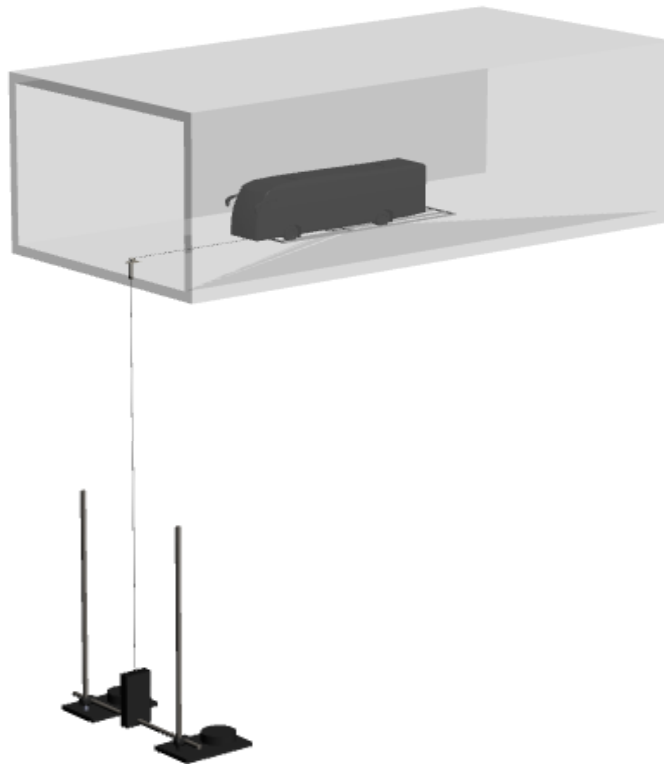


Fuente. Autores

Posteriormente se identificaron sensores de fuerza digitales PASCO CI-6537 en el inventario de los laboratorios de física de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los cuales proporcionan un rango de medición de -50 a 50 N y garantizan una tolerancia de ± 0.03 N; con la facilidad de estos se utilizó el agujero de la sección de pruebas en el cual se encuentra acoplado un tubo pitot, allí se ubicó una pequeña polea impresa en ABS que permitió el movimiento de un hilo de cáñamo, ideal por su resistencia a la tracción para servir como conexión entre el modelo y el sensor.

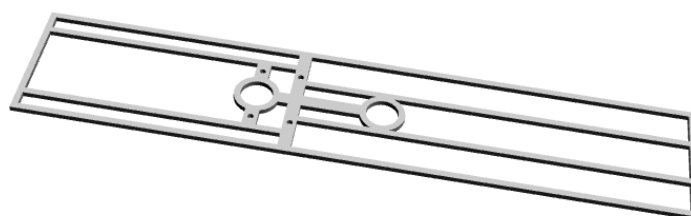
El sensor de fuerza fue ubicado en la parte exterior del túnel, este se fijó mediante dos soportes universales los cuales tenían masa adicional en su base garantizando que no existiera movimiento alguno, se dispuso de forma vertical para registrar la fuerza de tensión ejercida en el hilo por acción del flujo de aire sobre el modelo, equivalente a la resistencia aerodinámica. Finalmente, al sistema le fue diseñada una guía para evitar la colisión del modelo con la sección de pruebas en caso de que cambiara su trayectoria, ésta fue realizada en MDF y adherida al suelo como rieles para las llantas ...Figura 21...

Figura 20. Montaje del sistema de medición de fuerza en la sección de pruebas



Fuente. Autores

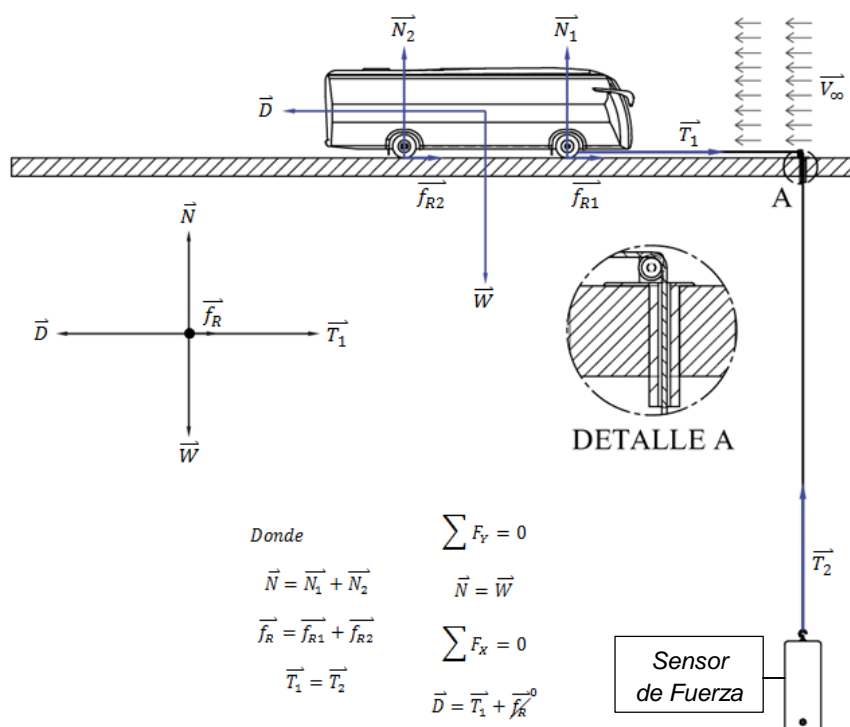
Figura 21. Guía del modelo en la sección de pruebas



Fuente. Autores

Los resultados del sensor de fuerza fueron obtenidos utilizando la interfaz PASCO 750, la cual operó junto al software Data Studio permitiendo graficar y visualizar los datos en tiempo real, inicialmente fue programada una frecuencia de 10 Hz, pero ya que presentó una cantidad de datos excesiva ésta se redujo a la mitad. Se realizaron numerosas pruebas con diferentes sensores, eligiendo los que presentaron menor variación en los resultados con el fin de lograr la mejor precisión posible, cada prueba se realizó a las máximas RPM del túnel de viento durante 10 minutos permitiendo así que se estabilizara la velocidad del flujo, además con el fin reducir efectos por la fricción se aplicó una capa de aceite en la polea y entre las ruedas y el piso de la sección de pruebas del túnel de viento, despreciando así dicha fuerza.

Figura 22. Diagrama de cuerpo libre del sistema de medición de fuerza



Fuente. Autores

6. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

El procedimiento que se describe en esta sección hace referencia a la metodología empleada en las simulaciones CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) haciendo uso del software ANSYS-Fluent, estas fueron realizadas sin y con el dispositivo en dos diferentes etapas: 1) simulaciones con el dominio recomendado en la literatura de aerodinámica exterior de acuerdo a ANSYS, Inc¹⁷ y Lanfrit¹⁸ y, 2) simulaciones con un dominio del mismo tamaño de la sección transversal del túnel de viento de la Fundación Universitaria Los Libertadores; para ambas etapas se tuvieron en cuenta las variables físicas tomadas durante la experimentación...Tabla 5....

Tabla 4. Variables de la simulación computacional

Variables Físicas	Dominio Literatura	Dominio Túnel de Viento
<i>Dimensiones H-W-U-D* (m)</i>	<i>0.86 x 0,63 x 1.53 x 2.55</i>	<i>0.4 x 0.6 x 1.53 x 2.55</i>
<i>Velocidad (m/s)</i>	<i>37.8</i>	<i>37.8</i>
<i>Presión (Pa)</i>	<i>74800</i>	<i>74800</i>
<i>Temperatura (K)</i>	<i>292.72</i>	<i>292.72</i>
<i>Viscosidad (kg/m-s)</i>	<i>1.8109e-05</i>	<i>1.8109e-05</i>

** Donde; H: height (Altura); W: width (Ancho); U: upstream (Aguas arriba); D: downstream (Aguas abajo)*

Fuente. Autores

Las simulaciones computacionales se realizaron con el fin de verificar y comparar los resultados obtenidos de las pruebas experimentales en el túnel de viento y visualizar el comportamiento del flujo en zonas donde no fue posible hacerlo. Estas estuvieron sujetas a las características del equipo de cómputo, principalmente a la memoria RAM y al número de procesadores, siendo determinantes en la efectividad de las simulaciones y el tiempo de cálculo, por lo cual se emplearon diferentes ordenadores durante la secuencia de simulación...Figura 23....

En la primera fase de la secuencia se simplificaron detalles del CAD, sin eliminar zonas de importancia para el estudio que alteraran de forma considerable el comportamiento del flujo y garantizando que la superficie del modelo se encontrara

¹⁷ ANSYS, Inc. Lecture 3: Cell Zone and Boundary Conditions [Diapositivas]. ANSYS, Inc: 2015.

¹⁸ LANFRIT, Marco. 2005. Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT. Darmstadt : Fluent Deutschland GmbH, 2005.

cerrada para evitar contratiempos más adelante. Se evitaron ángulos agudos entre los vértices y cambios bruscos de la superficie del modelo con el fin de facilitar el mallado y lograr una buena calidad de este.

Figura 23. Secuencia de la simulación



Fuente. Autores

Tabla 5. Equipos de cómputo utilizados

Ordenador	RAM (GB)	Procesador (Núcleos)
1	4	4
2	8	4
3	8	8
4	32	12

Fuente. Autores

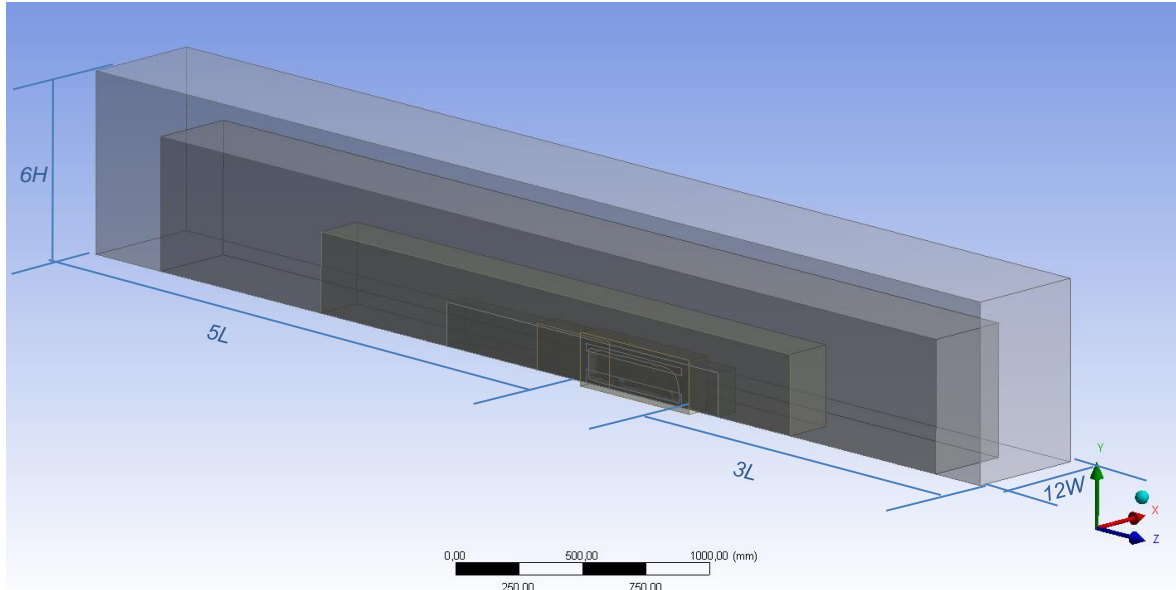
Asumiendo que el flujo es simétrico se realizaron los dominios para simular medio modelo reduciendo costo computacional, el primer dominio establecido siguió el volumen de control recomendado en la literatura, el cual plantea que las dimensiones deben ser mínimo tres veces la longitud del modelo aguas arriba, cinco veces aguas abajo y que la relación entre áreas transversales no supere el 1.5% Lanfrit¹⁹. Para el caso del segundo dominio establecido se utilizó el área transversal de la sección de pruebas del túnel de viento en el cual fue realizada la experimentación, se utilizaron las mismas longitudes del caso anterior aguas arriba y aguas abajo con el fin de permitir el desarrollo del flujo y evitar flujo reverso.

En la siguiente etapa se utilizó el módulo de mallado del software, en éste se crearon un máximo de 10 mallas para cada dominio de entre dos y 17 millones de elementos encontrando así la independencia del resultado al número de elementos de la malla, lo que se conoce como análisis de convergencia de malla. El refinamiento se realizó mediante la estrategia de cajas internas creadas en el módulo de geometría como cuerpos de influencia alrededor del bus, en la región de la estela y en zonas donde los elementos presentaron baja calidad con el fin de controlar el tamaño de la malla como se observa en la Figura 24, el objetivo de esto fue representar lo mejor posible

¹⁹ LANFRIT, Marco. *Ibíd.*

la geometría para permitir captar el comportamiento del flujo y lograr la mejor calidad de los elementos de la malla en cuanto a la oblicuidad y ortogonalidad.

Figura 24. Dominio recomendado por la literatura con cuerpos de influencia



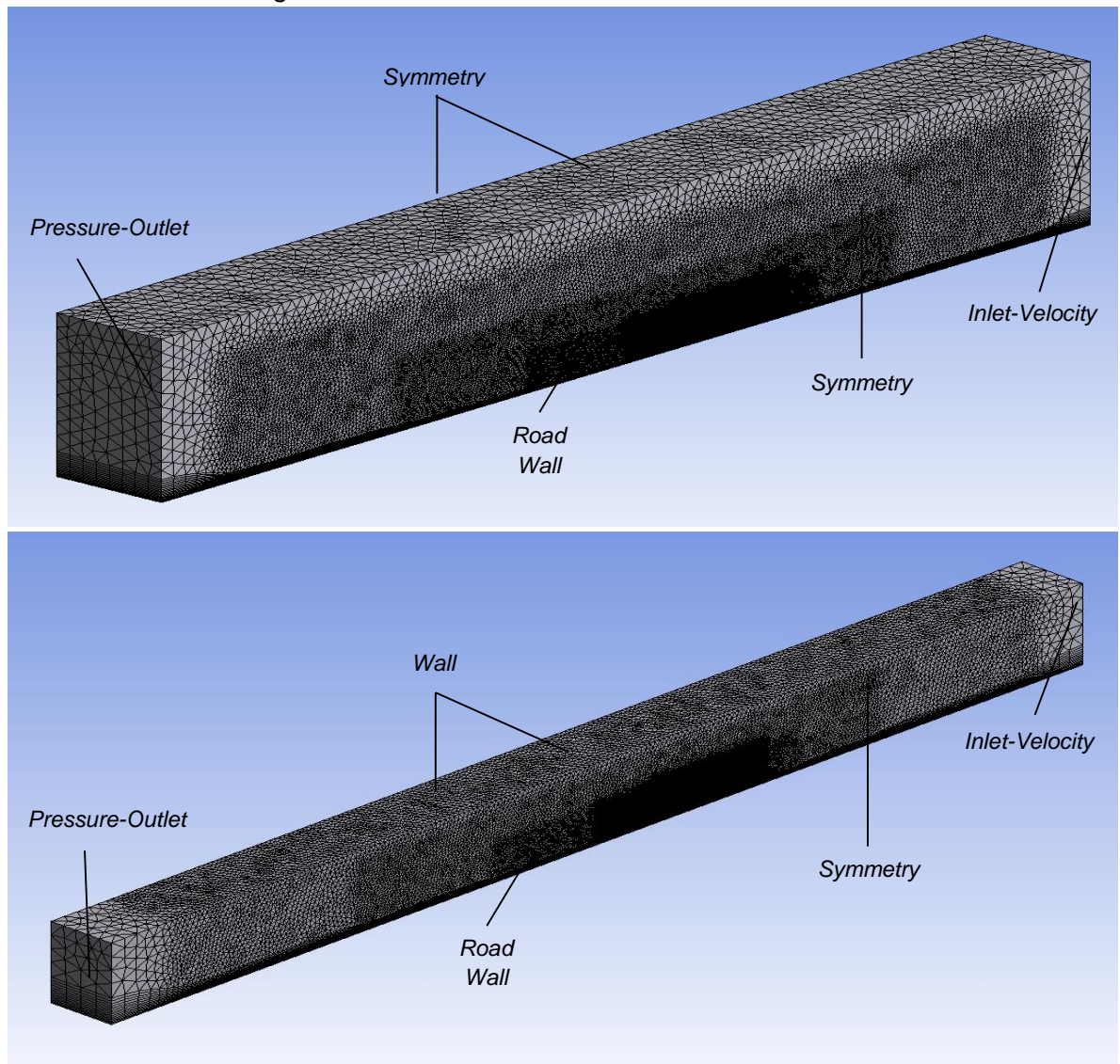
Fuente. Autores

La malla fue realizada con dos tipos de elementos buscando obtener la mejor calidad con el menor número de elementos, garantizando la representación correcta de la geometría; los primeros fueron capas de prismas adheridos al modelo y a la superficie del suelo, por su alineación con el flujo en las superficies son ideales para captar los fenómenos de la capa límite, resolver el perfil de velocidad presente en esta y evitar la difusión numérica entre nodos; el segundo tipo de elementos que completó el dominio fue tetraédrico, elegido por representar de manera adecuada el modelo y el flujo gracias a su versatilidad para adaptarse a las geometrías, facilitando el mallado en comparación con los elementos hexaédricos.

Las capas prismáticas se generaron utilizando la opción First Aspect Ratio del inflation, permitiendo controlar la relación de aspecto entre la altura y el ancho del prisma para definir la longitud total de las capas y establecer valores de y^+ bajos que permitieran resolver el perfil de velocidad. El número de capas se incrementó a medida que se refinó la malla hasta llegar a 18 capas con una tasa de crecimiento del 6%, esto con el fin de evitar errores en los resultados por cambios rápidos en el tamaño de los elementos, cabe resaltar que también se tuvo en cuenta una tasa de crecimiento baja entre la transición de los elementos prismáticos y los elementos tetraédricos.

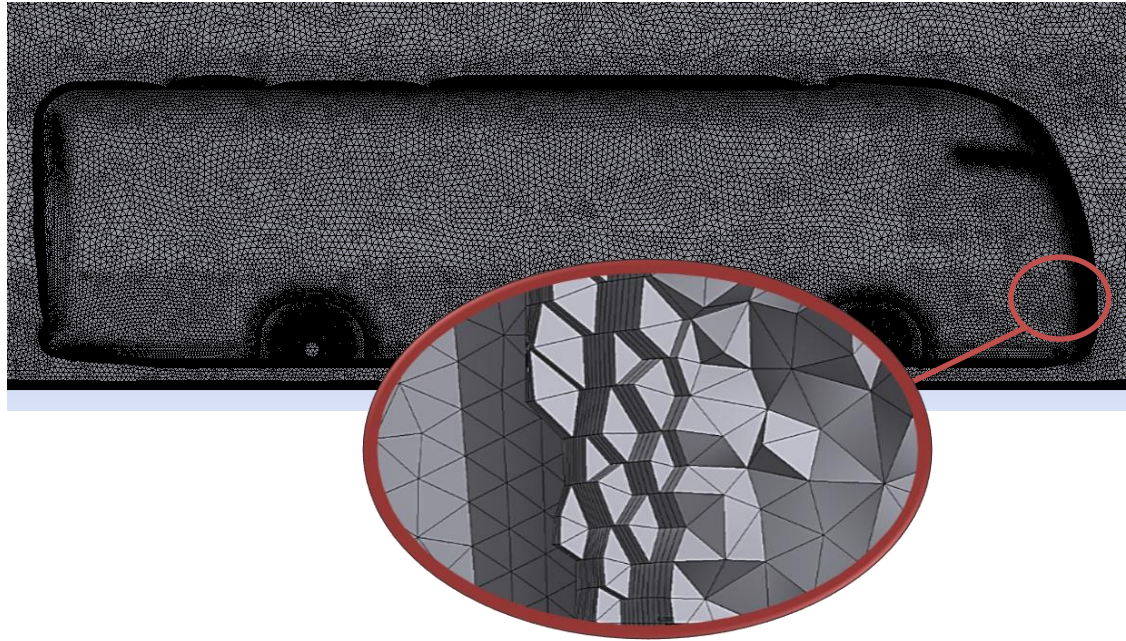
Al finalizar el mallado se nombró cada una de las superficies que conformaron los límites del volumen de control teniendo en cuenta sus condiciones de frontera, las cuales fueron establecidas gracias al promedio de los datos tomados durante la experimentación, la definición de estas varió para los dos tipos de dominio simulados, tomando Wall para las paredes en el dominio de la sección de pruebas y Symmetry representando el aire libre con el dominio recomendado por la literatura. En la siguiente imagen se presentan los nombres y condiciones de frontera definidas para cada dominio:

Figura 25. Condiciones de frontera de los dominios



Fuente. Autores

Figura 26. Elementos que componen el dominio



Fuente. Autores

En la fase del Setup se programaron las variables necesarias para la simulación, dentro de las cuales se destacan la definición del modelo de turbulencia, el algoritmo de la solución y las condiciones de frontera. Allí además se realizaron correcciones a la malla utilizando el comando **mesh>repair-improve>improve-quality** para lograr mejor calidad de los elementos aumentando la ortogonalidad mínima como valor de referencia, otra corrección de la malla fue el reordenamiento del dominio para disminuir el tiempo de cálculo, para esto se utilizó el comando **mesh>reorder>reorder-domain** buscando obtener un valor de 1, ambos códigos se ingresaron repetitivamente hasta obtener los valores deseados.

La simulación de CFD se llevó a cabo con el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, pues es el más utilizado y validado de acuerdo a Versteeg y Malalaskera²⁰. Según Sachin et al²¹, es conocido por su robustez y diferentes investigadores alrededor del mundo como Lanfrit²² en el 2005, lo recomiendan para el estudio de la aerodinámica externa. El enfoque del modelo $k-\epsilon$ está en los mecanismos que afectan la energía cinética turbulenta, lo que permite un desarrollo preciso de la estela y una mejor

²⁰ VERSTEEG, H K y MALALASAKERA, W. Op cit. p.67.

²¹ SACHIN, Thorat y GAMBA Prasad Rao. 2011. Computational analysis of Intercity bus with improved aesthetics and aerodynamic performance on indian roads. International Journal of Advanced Engineering Technology: Vol II, p. 103-109, 2011

²² LANFRIT, Marco. Op cit.

visualización para su análisis, a través de las ecuaciones de transporte RANS sumados a términos matemáticos para la energía cinética y la tasa de disipación de energía cinética turbulenta.

Aunque se han encontrado usos de modelos de turbulencia como SPALART ALMARAS, RSM y $k-\omega$ en simulaciones similares proporcionando alto grado de precisión y confiabilidad, se elige Realizable $k-\epsilon$ dado que su requisito computacional se adecua a los equipos disponibles para el desarrollo de la simulación. Lanfrit²³ muestra el porcentaje de error con algunos modelos de turbulencia y diferente refinamiento de malla, validado con experimentación en túnel de viento, con lo cual se muestra una diferencia del 2% para $k-\epsilon$ y once millones de celdas, lo que representa un grado de exactitud alto para las investigaciones y es suficiente para la simulación del Marcopolo 1200 G7.

Para finalizar el proceso la solución fue llevada a cabo utilizando el algoritmo Coupled con segundo orden de discretización en cada una de sus variables, siguiendo las recomendaciones de tutoriales de ANSYS para evitar divergencia y facilitar la solución fue necesario utilizar diferentes algoritmos o diferente grado de discretización en las primeras iteraciones de cada simulación dependiendo el dominio que se estuviese llevando a cabo.

Para el caso del dominio de la literatura se simuló con algoritmo Coupled en primer orden hasta que se lograra convergencia en 10^{-3} y después fue cambiado el orden de discretización a segundo, completando un mínimo de 700 iteraciones ya que en este valor el C_D no presentaba cambios. El caso de la simulación de dominio con sección transversal del túnel de viento fue más complejo, este se llevó a cabo usando el algoritmo SIMPLE con primer y segundo orden de discretización hasta alcanzar 1000 iteraciones y posteriormente fue cambiado a Coupled en segundo orden hasta lograr más de 2000 iteraciones en donde el C_D se estabilizó.

²³ LANFRIT, Marco. *Ibíd.*

7. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales y las simulaciones computacionales realizadas previamente a la adición de los dispositivos diseñados y las posteriores a su implementación. En la Figura 27, se nombran algunas secciones relevantes del modelo para la comprensión de los resultados.

Figura 27. Secciones del modelo



Fuente. Autores

Los datos de la fuerza de resistencia aerodinámica presentaron tres variaciones debidos al análisis de convergencia de malla para ambos dominios y los resultados obtenidos de las pruebas experimentales de fuerza en el túnel de viento, de las cuales se realizaron numerosos ensayos para obtener un promedio del resultado.

7.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES SIN DISPOSITIVO

7.1.1 Resultados de resistencia aerodinámica. Se presentan los resultados de las pruebas experimentales en las cuales se midió la magnitud de la fuerza de resistencia, a la que fue sometido el bus sin dispositivos dentro del túnel de viento a la máxima velocidad del flujo de aire. Los resultados que se exponen son corregidos por efecto de Blockage ratio con una relación de áreas transversales del

6.18%. Las variables físicas y condiciones que se tuvieron en cuenta durante la toma de datos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Variables físicas y condiciones presentes durante la toma de datos experimentales

Variables durante la experimentación	
Escala del modelo	1:25,79
Área frontal del modelo (m^2)	0,0148
Presión Atmosférica (Pa)	74800
Velocidad de la corriente libre (m/s)	37,8
Temperatura promedio ($^{\circ}C$)	19,4
Densidad del aire (Kg/m^3)	0,8904
Sección transversal del túnel de viento (m^2)	0,24
Tolerancia del instrumento de medición (N)	$\pm 0,03$
Corrección Blockage ratio- ξ	0,0155
Número Reynolds*	$3,63 \times 10^5$

*Calculado con el valor de la distancia entre ejes

Fuente. Autores

Se realizaron varias pruebas experimentales de donde se obtuvieron tres series de datos con resultados óptimos, cada una de estas series cuenta con mil datos de fuerza medidos durante aproximadamente tres minutos, antes de la recolección de datos se tomaron cuatro minutos para aumentar de manera gradual la velocidad del flujo de aire y dos minutos para la estabilización en el túnel de viento, esto para cada una de las pruebas. Con los valores de fuerza de cada una de las series se calculó el coeficiente de Drag y se determinaron los valores máximos, mínimos y el valor promedio.

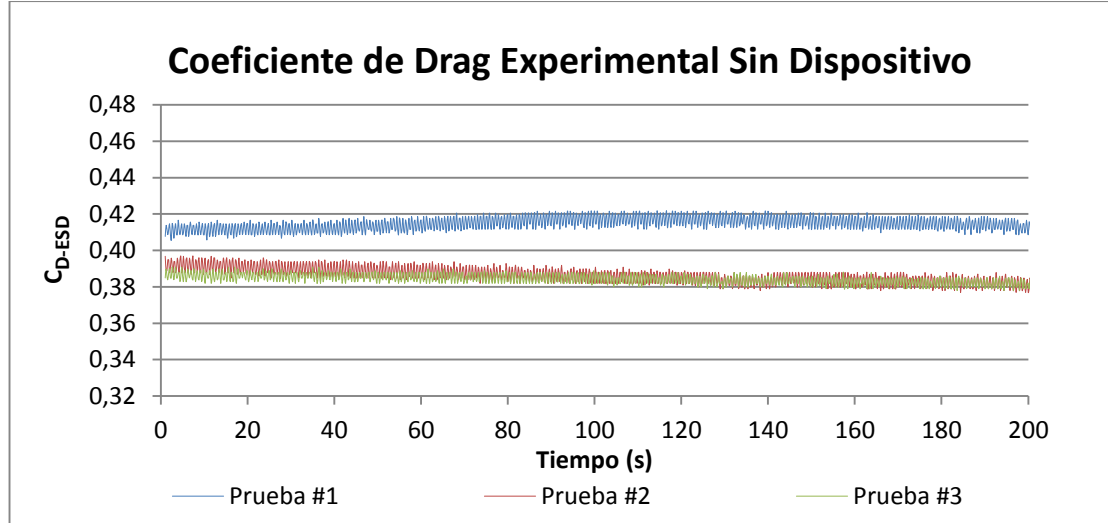
Tabla 7. Resultados datos experimentales.

Datos Experimentales					Corrección Blockage		
Prueba N°	F. Prom (N)	C _{D-ESD} Max	C _{D-ESD} min	C _{D-ESD} Prom	C _{D-ESD} Max	C _{D-ESD} min	C _{D-ESD} Prom
1	4,1813	0,4347	0,4183	0,4277	0,4216	0,4057	0,4148
2	3,8940	0,4091	0,3887	0,3983	0,3968	0,3769	0,3863
3	3,8742	0,4030	0,3897	0,3963	0,3908	0,3779	0,3843
Promedio	3,9832	0,4156	0,3989	0,4074	0,4031	0,3869	0,3951

Fuente. Autores

La Gráfica 4 muestra la tendencia de los datos obtenidos en cada una de las pruebas experimentales.

Gráfica 4. Resultados experimentales del Coeficiente de Drag del Bus Sin Dispositivo, (C_{D-ESD}).



Fuente. Autores

El coeficiente de Drag que se toma como resultado de las pruebas experimentales sin dispositivos (C_{D-ESD}) es 0,3951 y es el valor de referencia para realizar la comparación de los resultados experimentales con dispositivo y computacionales sin dispositivo... Tabla 7....

7.1.2 Visualización experimental del comportamiento aerodinámico del bus.

La visualización del flujo se realizó mediante los métodos de: mezcla de aceite de linaza y dióxido de titanio, tufts y cámara de humo como se explicó en el capítulo anterior.

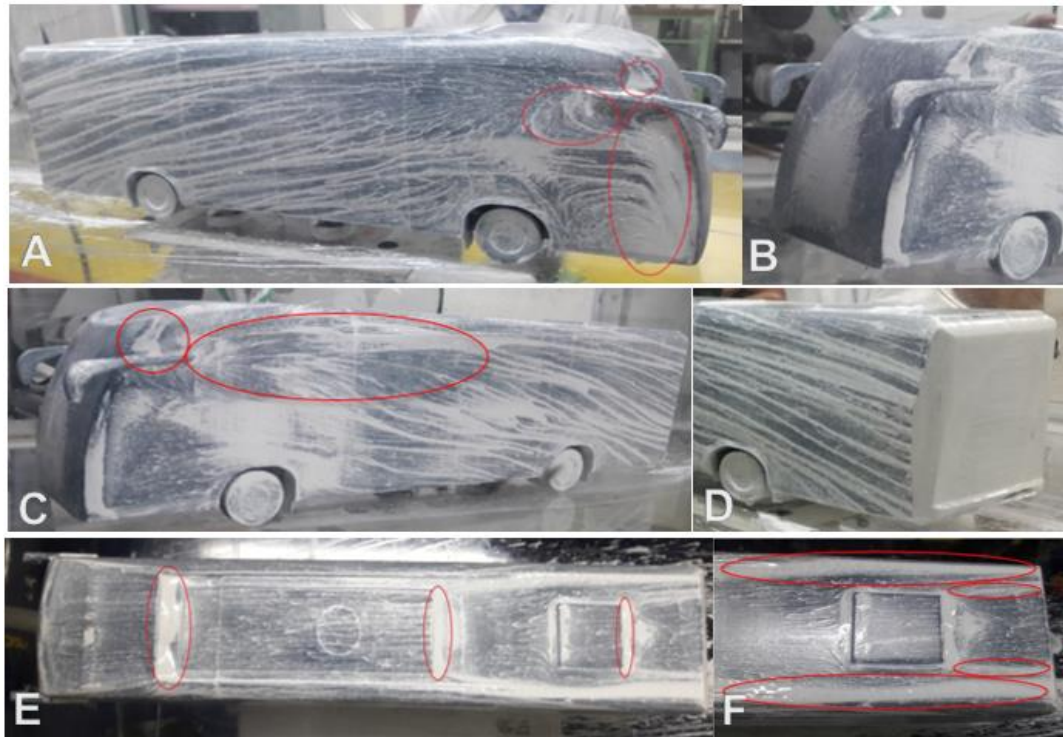
La prueba experimental con el dióxido de titanio permitió identificar la dirección del flujo de aire en la superficie del bus, zonas de estancamiento, recirculación y vorticidad, siendo el método de visualización experimental más efectivo. En el flujo superficial se evidenció que las zonas laterales ubicadas bajo los retrovisores presentan recirculación, además, los espejos generan vórtices longitudinales que se prolongan hasta la estela turbulenta trasera del bus... Figura 28. A, C.... Se identificó que a partir de los espejos el aire fluye en dirección ascendente hasta aproximadamente la mitad del bus y posteriormente el flujo desciende hasta la sección trasera, las líneas de corriente de aire que pasan por debajo de los espejos

toman una dirección descendente a diferentes ángulos, se presenta turbulencia detrás de los bocales, ...Figura 29....

La orientación que toma el flujo en las dos superficies laterales es diferente en algunos aspectos, puesto que en el lado derecho se evidenció una región de recirculación mayor que en la región izquierda. Es posible atribuir estas características a una pequeña asimetría del cuerpo en los espejos, aunque como lo menciona Barlow²⁴ el flujo puede presentar disimetría en cuerpos simétricos.

En la parte superior del bus se evidenció separación de la capa límite y su reinserción en diferentes regiones, se genera una zona de estancamiento entre el aire acondicionado y la superficie delantera (Joroba), se generan pequeñas estelas turbulentas después del aire acondicionado y detrás de la claraboya en sus extremos laterales traseros se presentan vórtices que se propagan hasta la estela turbulenta del bus ...Figura 28. F.... La superficie frontal del bus presenta estancamiento del aire y en la superficie trasera no hay indicios de flujo superficial debido a la baja velocidad en ésta zona ...Figura 28. B, D....

Figura 28. Prueba de visualización de mezcla de aceite de linaza y dióxido de titanio.

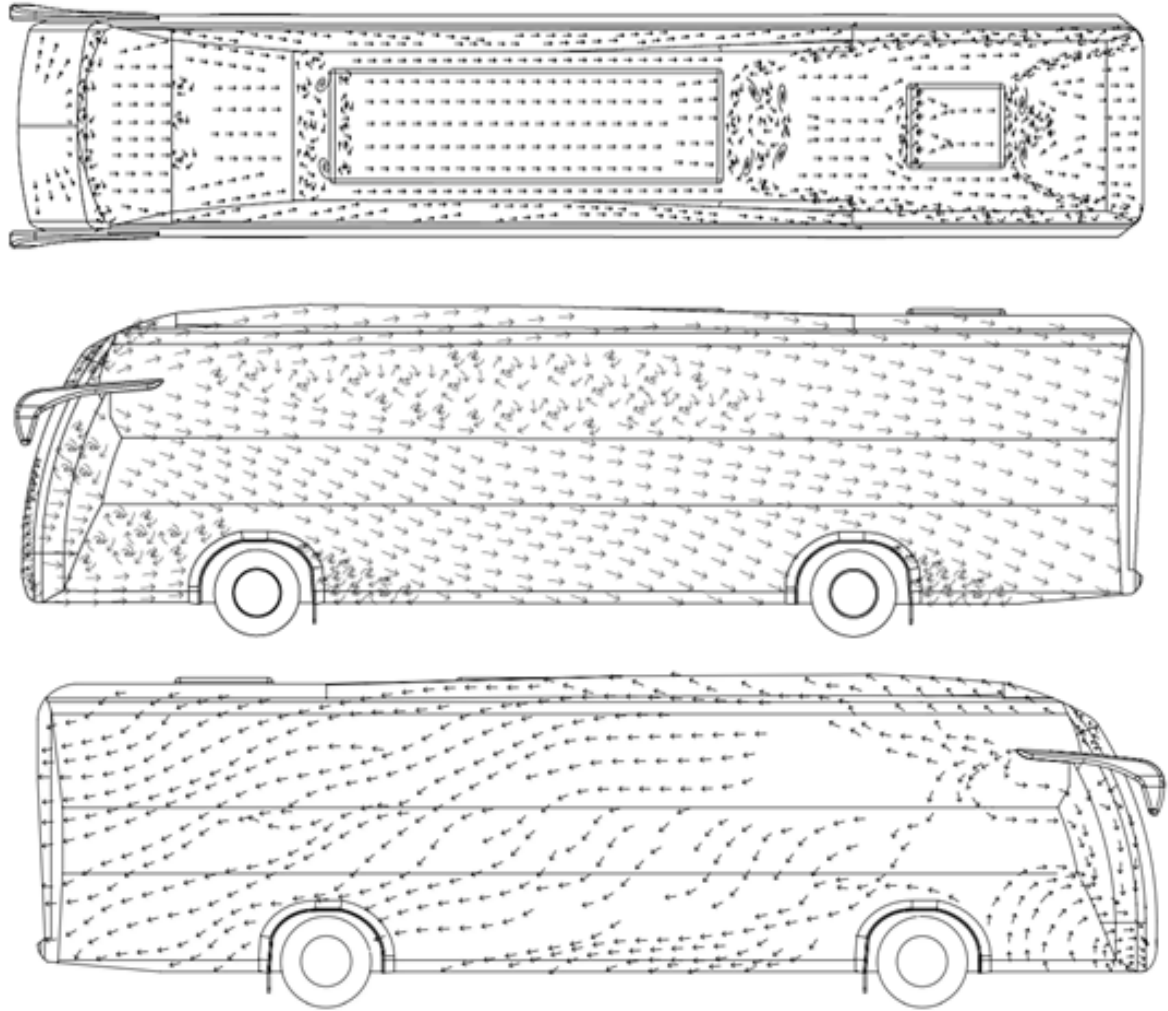


Fuente. Autores

²⁴ BARLOW, Jewel. Op cit. p. 200.

A partir de las anteriores pruebas, en la Figura 29 se esbozaron las líneas de flujo interpretadas sobre las superficies del modelo.

Figura 29. Líneas de flujo superficial

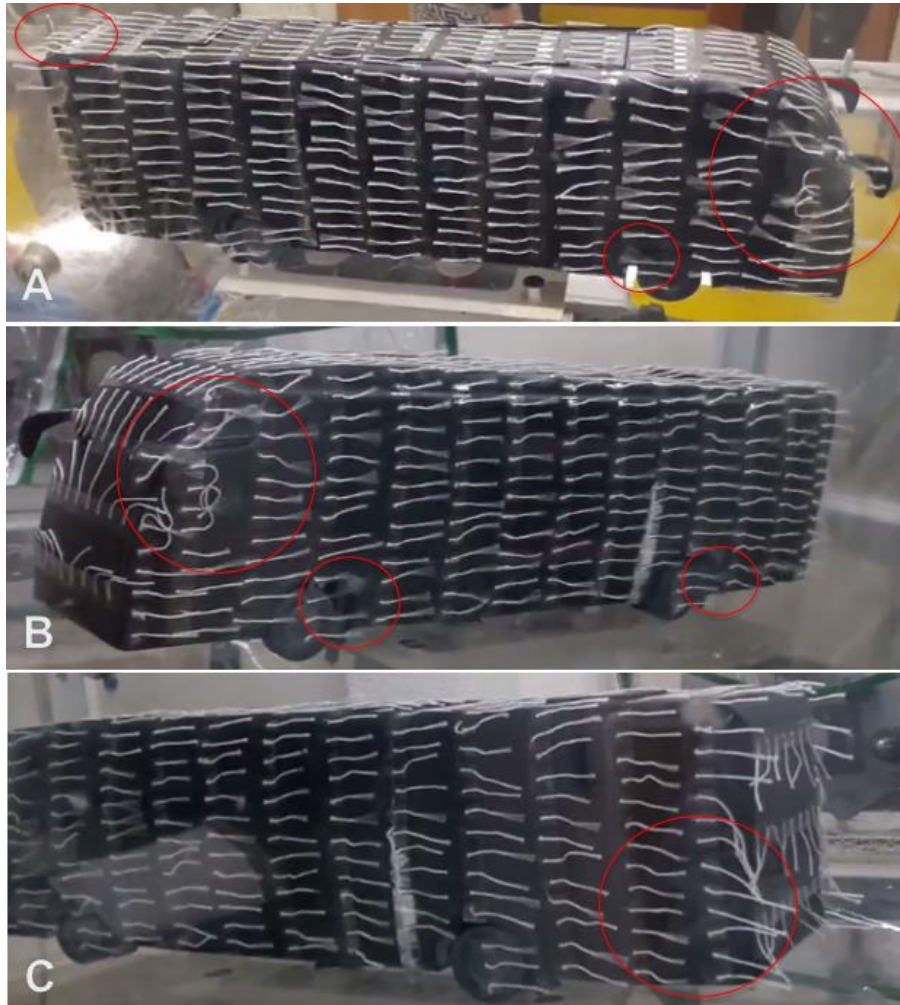


Fuente. Autores

La segunda prueba experimental de visualización se realizó con el método tufts la cual permitió identificar zonas de turbulencia y recirculación, validando lo que se observó con la prueba anterior. En la Figura 30. A,B. se observa una fuerte turbulencia detrás de los espejos y bocales, una zona de recirculación del flujo debajo de los espejos, en la región superior del bus los mechones de hilo siguen el flujo de aire de una forma lineal ...Figura 30. A..., y en la Figura 30. B. se encuentra el punto de estancamiento del aire en la superficie frontal del bus. En la figura 30. C. se observa una zona de baja presión en la superficie trasera del bus, de tal

manera que la fuerza generada por esta no es lo suficiente como para que los mechones de hilo se sustenten, así mismo algunos de estos hilos demuestran la dirección del flujo en este punto dando una idea de la estela turbulenta generada detrás del bus.

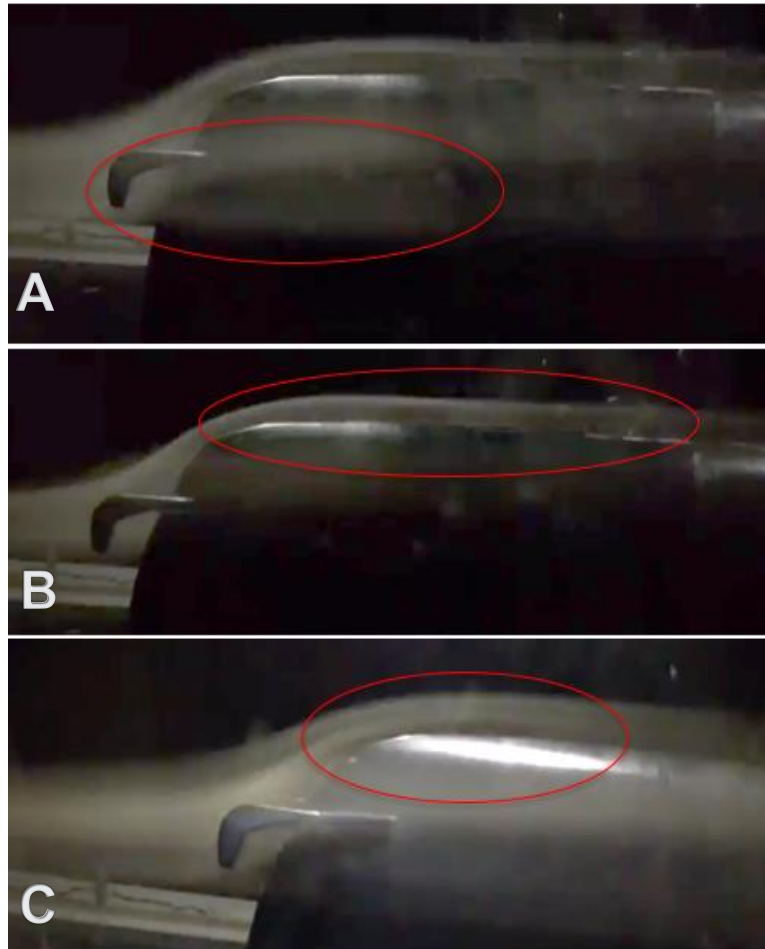
Figura 30. Prueba de visualización método Tufts



Fuente. Autores

La última prueba de visualización que se realizó en esta etapa fue bajo el método de la cámara de humo, ésta no permitió obtener resultados a la máxima velocidad de la corriente libre de aire en el túnel de viento debido a la disipación del humo, por lo tanto, solo se tiene en cuenta en la primera etapa de los resultados. La Figura 31. A, muestra la generación de vórtices producidos por los extremos de los espejos, en la Figura 31. B, C. se identifica la separación de la capa límite sobre la joroba del bus.

Figura 31. Prueba de visualización con humo



Fuente. Autores

7.2 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES SIN DISPOSITIVO

Los datos para ambos dominios computacionales que se encuentran a continuación presentan Coeficientes de Drag (C_D) debidos a la suma de la fuerza por presión y a la fuerza viscosa también conocida como fuerza por fricción con la superficie. Cabe resaltar que los datos experimentales solo fueron comparados con la simulación de su misma área transversal (túnel de viento), garantizando las mismas condiciones de frontera.

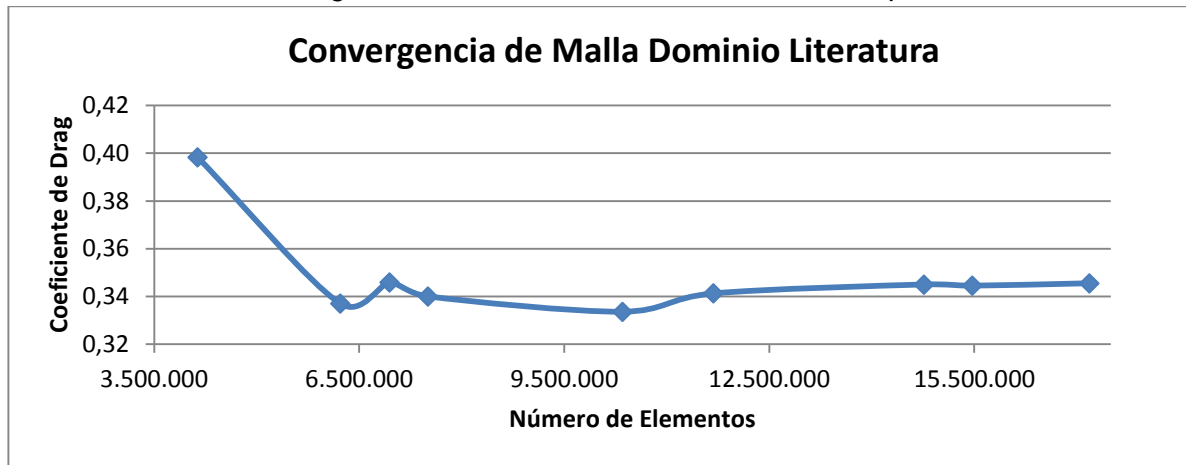
7.2.1 Datos de las simulaciones con dominio recomendado por la literatura. A continuación, se exponen los resultados obtenidos en las simulaciones computacionales con el volumen de control recomendado para aerodinámico exterior en vehículos, con las dimensiones enunciadas en la Tabla 4.

Tabla 8. Valor del C_D con diferente número de elementos (Dominio literatura)

Número de elementos	C _{P-SSD}	C _{V-SSD}	C _{D-SSD}	Error porcentual entre mallas (%)	
4.135.291	0,3252	0,0730	0,3982	18,16	2,56
6.219.892	0,2624	0,0747	0,3371		
6.943.080	0,2702	0,0757	0,3459	1,74	
7.504.673	0,2591	0,0810	0,3400		2,25
10.351.193	0,2486	0,0850	0,3336	1,43	
11.683.761	0,2457	0,0955	0,3413		0,14
14.765.546	0,2456	0,0994	0,3450	0,29	
15.472.752	0,2447	0,0998	0,3445		
17.184.297	0,2447	0,1008	0,3455		

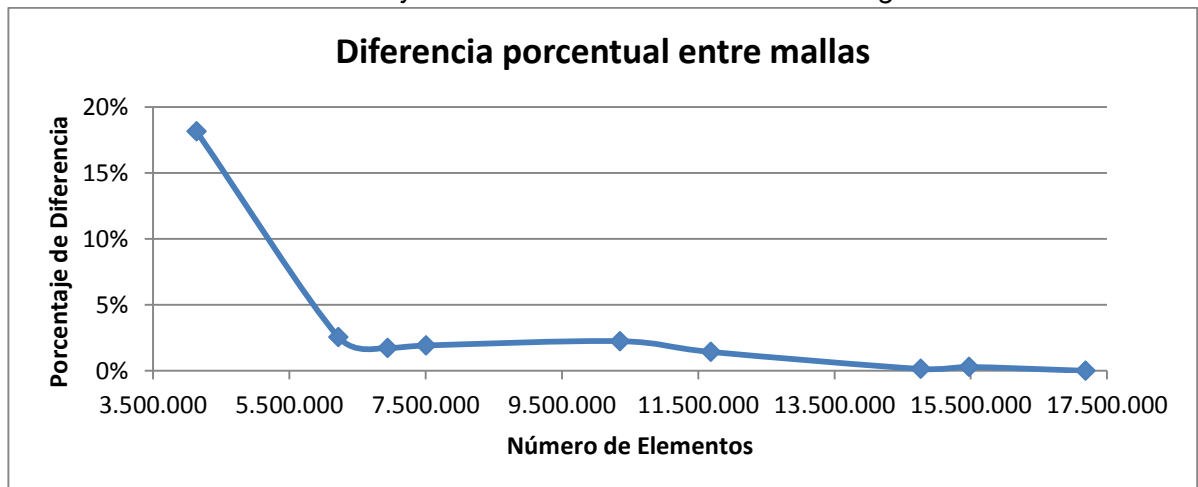
Fuente. Autores

Gráfica 5. Convergencia de malla del dominio recomendado por la Literatura



Fuente. Autores

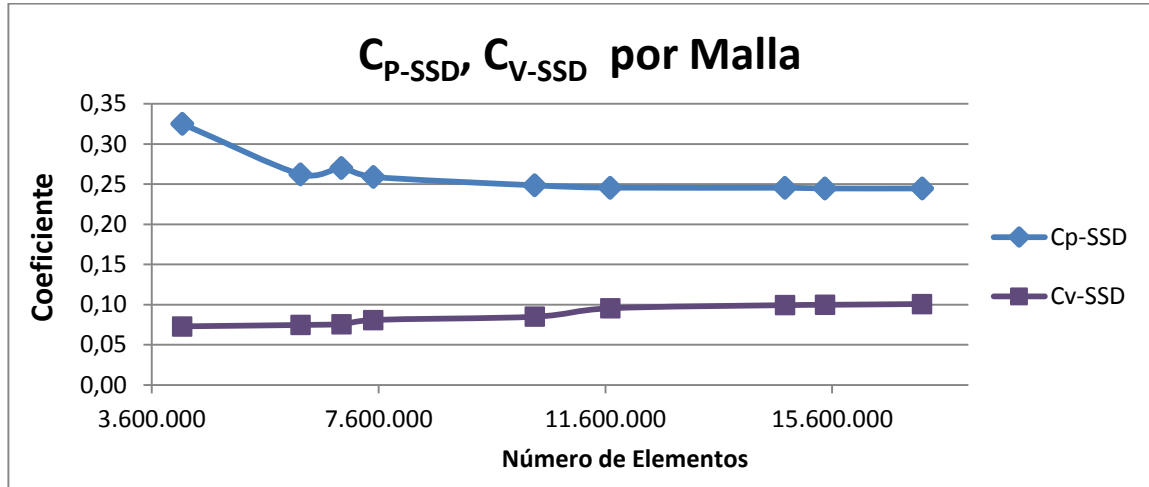
Gráfica 6. Porcentaje de diferencia de la fuerza con el siguiente valor



Fuente. Autores

Para la simulación con el volumen de control recomendado en la literatura se presentó un valor de C_D de aproximadamente 0,345 logrando convergencia en la malla de 14.765.546 millones de elementos la cual tiene un Y^+ de 3,9573.

Gráfica 7. Comportamiento de los coeficientes C_{P-SSD} , C_{V-SSD} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas dominio literatura



Fuente. Autores

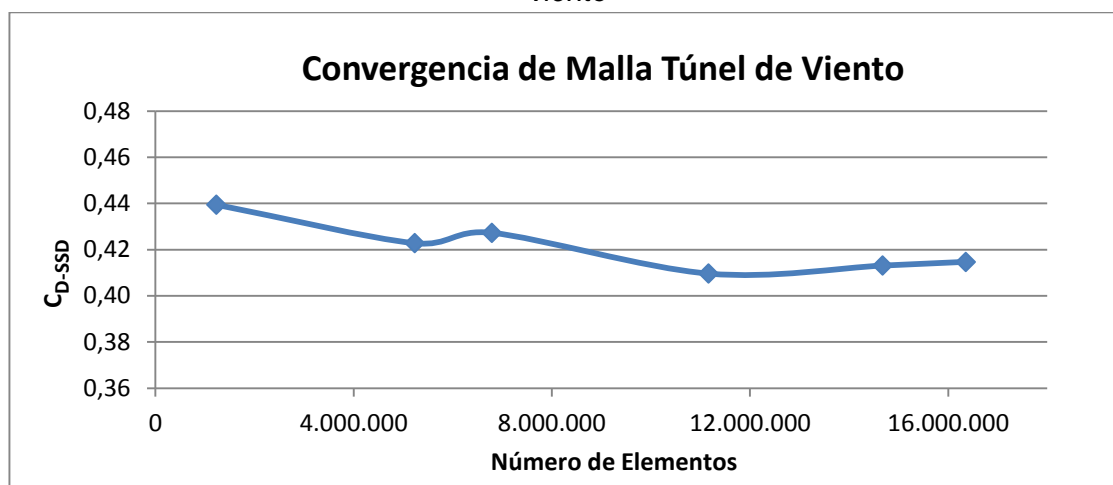
7.2.2 Datos de las simulaciones del dominio con sección transversal del túnel de viento sin dispositivo. En esta sección se presentan todos los datos referentes a las simulaciones con sección transversal del túnel de viento sin dispositivo, así como también se hace una comparación de los resultados cualitativos y cuantitativos respecto a las pruebas experimentales del bus sin dispositivo, encontrando que existe un error porcentual entre los Coeficientes de Drag experimental y de simulación de 4.55%.

Tabla 9. Valor del C_{P-STSD} , C_{V-STSD} y C_{D-STSD} respecto al número de elementos de las mallas simuladas y Error porcentual respecto al C_{D-ESD} , (0,3951)

Número de Elementos	C_{P-STSD}	C_{V-STSD}	C_{D-STSD}	Error (%)	Error Porcentual entre Mallas (%)	
1.224.431	0,3809	0,0585	0,4395	11,2214	3,9364	1,0519
5.228.437	0,3298	0,0930	0,4228	7,0092		
6.786.938	0,3156	0,1117	0,4273	8,1468	4,3146	0,8387
11.160.601	0,3068	0,1028	0,4096	3,6737		
14.672.191	0,3051	0,1080	0,4131	4,5506	0,3915	
16.351.062	0,3056	0,1091	0,4147	4,9615		

Fuente. Autores

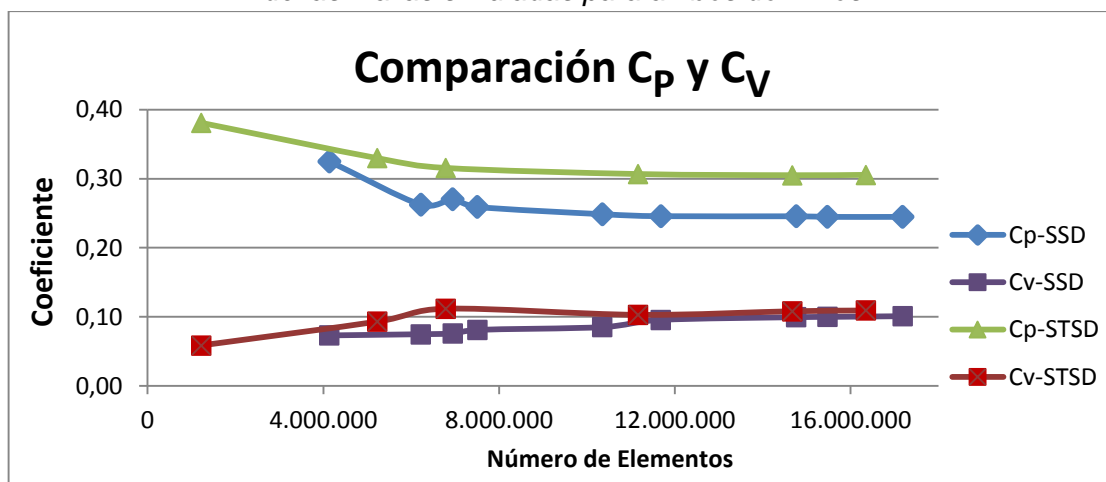
Gráfica 8. Convergencia de malla para el dominio con sección transversal del túnel de viento



Fuente. Autores

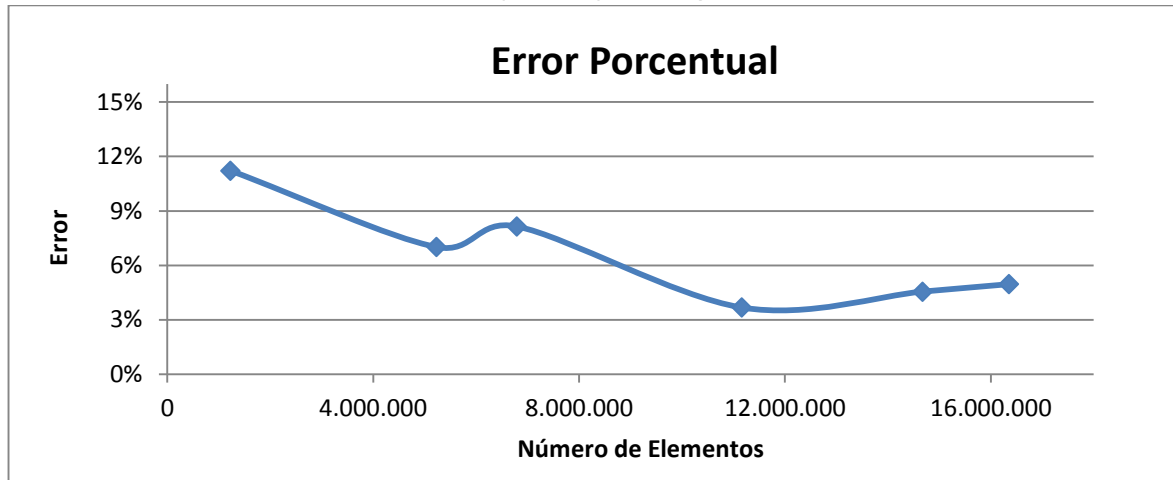
De acuerdo a los resultados presentados y a la Gráfica 8 donde se muestra la convergencia de malla para las simulaciones del dominio con sección transversal del túnel de viento, se considera que la malla óptima posee 14.672.191 elementos, con un promedio de Y^+ de 3,9761, 18 capas de prismas y como resultado un C_{D-SSD} de 0.4131 que corresponde a un error porcentual de 4.5506% respecto al coeficiente experimental C_{D-ESD} (0,3951), y un error porcentual de 0,8387% y 0,3915% entre las mallas con número de elementos de 11.160.601 y 16.351.062 respectivamente. De acuerdo a esta malla se confrontarán los resultados de las simulaciones con dispositivos, la información de la misma se podrá encontrar en el Anexo D.

Gráfica 9. Comportamiento de los coeficientes C_P , C_V , respecto al número de elementos de las mallas simuladas para ambos dominios



Fuente. Autores

Gráfica 10. Error porcentual entre los datos de coeficiente de Drag experimental (C_{D-ESD}) y simulado (C_{D-STSD}) sin dispositivos



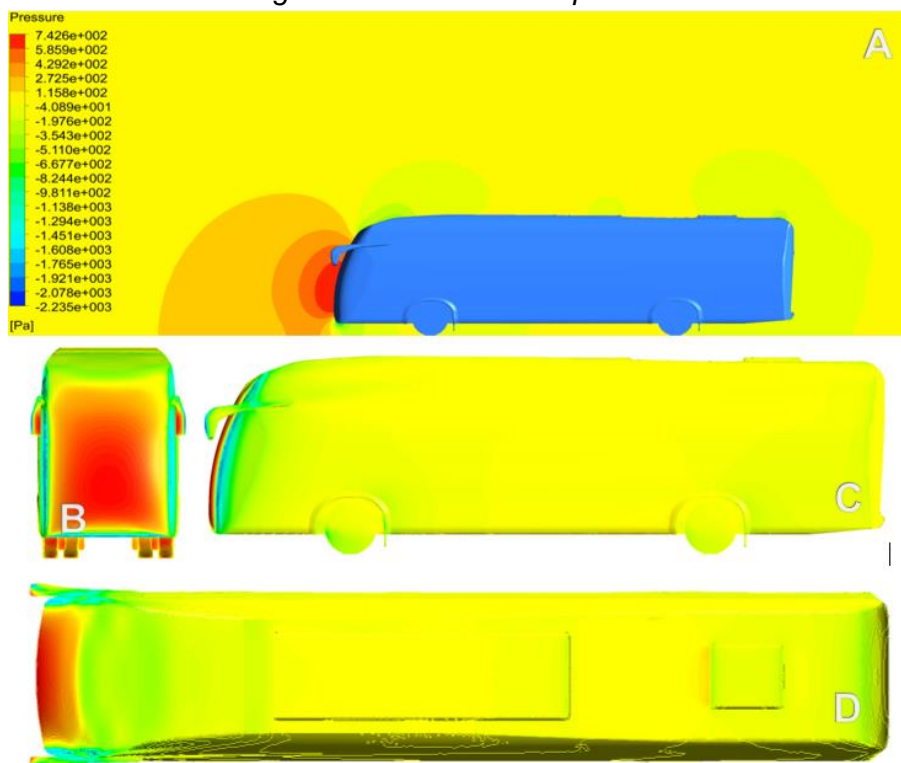
Fuente. Autores

La Gráfica 9, muestra el comportamiento de los coeficientes de presión y viscosidad de acuerdo al número de elementos de las mallas simuladas para el dominio con sección transversal del túnel de viento en comparación con el dominio de la literatura, se observa que el C_{V-SSD} es menor en las mallas con menor número de elementos y que correspondían a un Inflation nulo o con bajo número de capas de prismas, es decir que el cálculo sobre la superficie de las paredes es de baja calidad y no se resuelve la capa limite correctamente. El C_{P-SSD} tiene una convergencia óptima. En la Gráfica 10 se observa el error porcentual de cada uno de los C_{D-SSD} por malla respecto al C_{D-ESD} .

En seguida se exponen los resultados de visualización y gráficas obtenidas a partir de la malla óptima para el caso del dominio con sección transversal del túnel de viento sin dispositivo.

La Figura 32. A, muestra el contorno de presiones sobre el plano de simetría del bus, en el cual se puede observar que la presión es máxima en el plano frontal del bus, lo cual se corrobora con la figura 32. B. se observa una disminución de presión que se encuentra en el rango -8.244×10^2 Pa a -4.089 Pa sobre la superficie del bus en las zonas de la joroba, parte final del aire acondicionado y desde la claraboya hasta una distancia trasera del bus, la presión media del dominio se encuentra en el rango de -4.089 Pa a 1.158×10^2 Pa. En la figura 32. B, se muestra el contorno de presiones sobre la superficie frontal del bus, el cual es muy similar al que se muestra en la Figura 28. B, esto comprueba la alta presión en esta zona y el estancamiento de aire.

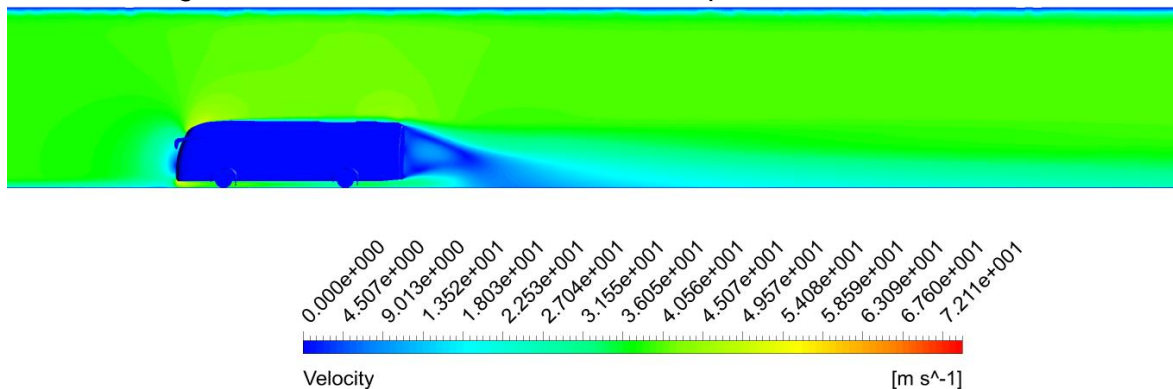
Figura 32. Contornos de presión.



Fuente. Autores

En el contorno de velocidad sobre el plano de simetría ...Figura 33..., se puede observar la estela turbulenta detrás del bus, la cual se extiende aproximadamente dos veces la longitud del modelo y se desvanece progresivamente, en la estela se observa que la velocidad del flujo de aire es mínima alcanzando valores cercanos a cero al igual que en una pequeña zona del plano frontal del bus, también se observa que en las paredes del bus y del dominio (suelo y techo) la velocidad del aire es cero.

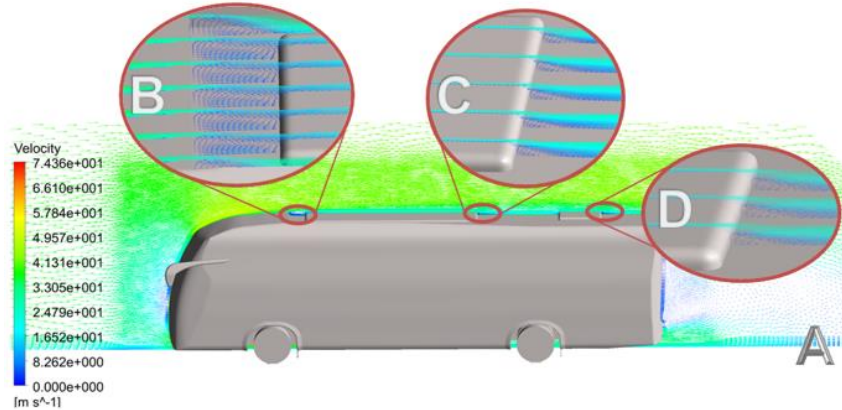
Figura 33. Contorno de velocidad sobre el plano de simetría del bus



Fuente. Autores

Los vectores de velocidad sobre el plano superior del bus, como se muestran en la Figura 34, permiten determinar las zonas de estancamiento del flujo de aire que se observan en la visualización experimental con la mezcla de dióxido de titanio y aceite de linaza, figuras 28. E, F, con la ventaja de demostrar que en estos puntos la velocidad del flujo es muy baja, casi igual a cero m/s.

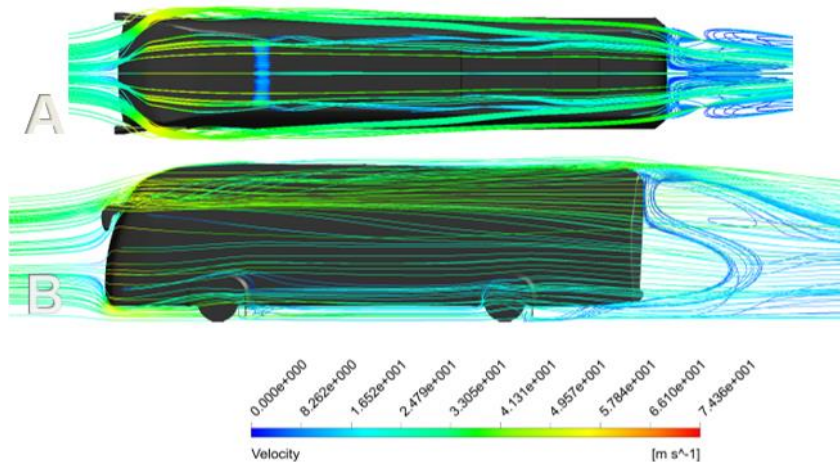
Figura 34. Vectores de velocidad



Fuente. Autores

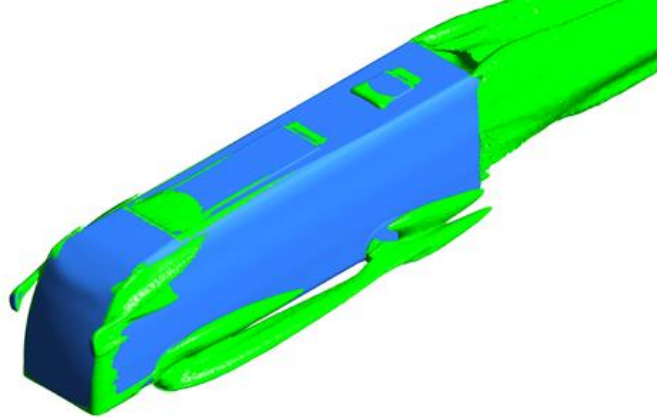
La Figura 35 comprueba lo mostrado en la Figura 29, ya que lo esbozado en estos planos es lo que se observa con la prueba de visualización de la mezcla de dióxido de titanio y aceite de linaza, así mismo se compara con los tufts en la Figura 30. C, D donde se aprecia el comportamiento de las líneas de flujo sobre el bus, el rango de colores permite identificar que el flujo es acelerado en la zona del espejo y en la zona inferior, Figura 35. B, desacerándose a lo largo del bus.

Figura 35. Streamlines de velocidad



Fuente. Autores

Figura 36. Isosuperficie de la Energía Cinética Turbulenta a un valor constante de 28.65 J/kg



Fuente. Autores

Tabla 10. Resultados con los tres métodos estudiados

Método	C_D	Diferencia con respecto al túnel de viento	
Simulación Dominio Literatura	0,3450	12,88 %	
Simulación Dominio del túnel	0,4131		
Experimentación en túnel de viento	0,3951		4,55 %

Fuente. Autores

Se evidencio que entre las simulaciones con ambos dominios el comportamiento de flujo alrededor del bus es similar sin embargo los valores obtenidos de C_D varían en gran medida entre las mallas óptimas.

Se comprobó que la fuerza generada por la fricción de las capas viscosas para un bus intermunicipal, representa una fracción mucho menor que la fuerza generada por la presión asociada a la forma, en este caso el Drag de forma o de presión representa entre un 70% a 90% de la fuerza total según los datos proporcionados por las simulaciones computacionales y el restante se debe a la fuerza de fricción, que aumenta proporcionalmente a la calidad de la malla.

Finalmente se puede resaltar que las simulaciones con las mismas condiciones de la experimentación permitieron alcanzar un valor acertado en cuanto al coeficiente de resistencia aerodinámica con una diferencia de 4,5506%, que además puede ser atribuida en parte a la inexactitud del sistema elaborado para la medición experimental de la fuerza.

7.3 RESULTADOS CON DISPOSITIVOS

A continuación se presenta el proceso desarrollado con los dispositivos, los cuales se diseñaron a partir de lo obtenido en los resultados anteriores y del estado del arte, con cada uno de ellos se realizaron pruebas en el túnel de viento y se eligieron los idóneos de acuerdo a los datos obtenidos de la resistencia al avance, aquellos que se destacaron fueron sometidos a todos los procesos experimentales y de simulación ya mencionados y al término de este capítulo son presentados los resultados como una comparación respecto al bus sin dispositivos.

7.3.1 Diseño de los Dispositivos. *El proceso de diseño partió de los resultados obtenidos de las simulaciones y las pruebas experimentales previas, en donde se identificaron todas aquellas zonas aprovechables para la implementación de un dispositivo. Se revisó el estado del arte de dispositivos similares a los planteados en este trabajo, prestando mayor atención en elementos patentados y utilizados en vehículos terrestres, sobre todo en vehículos tipo bloom, sin dejar de lado los adelantos logrados en otro tipo de investigaciones para reducir el Drag generado por diferentes fluidos.*

Conociendo la dirección del flujo, los puntos en los cuales se alteraba y la forma que tomaba, se plantearon diferentes alternativas. Además de la forma que debería tener el dispositivo para alterar presiones locales y la dirección del aire, fue necesario realizar pruebas en diferentes secciones del bus, ya que, a pesar de tener una aproximación muy cercana al comportamiento del flujo, se desconocían características del impacto de los dispositivos.

El diseño de los dispositivos se orientó principalmente en los espejos, las zonas laterales ubicadas bajo estos y en las zonas de generación de estela turbulenta y vórtices de la parte superior del modelo. Estos se enfocaron en la redirección del flujo y en generadores de vórtices que permitieran adherir la capa límite gracias a su mayor energía cinética.

Las alternativas planteadas fueron modeladas en CAD imprimiéndose en 3D las más prometedoras ... Figura 37..., se fijaron al modelo con cinta para pintores scotch-blue para superficies delicadas 2090, con el fin de facilitar el montaje y desmontaje. Inicialmente se realizaron pruebas en el túnel de viento para medir la fuerza debida a la resistencia aerodinámica, los dispositivos que presentaron las mejores condiciones en cuanto disminución de dicha fuerza se llevaron a los mismos procesos de experimentación y simulación mencionados anteriormente obviando la simulación con dominio recomendado por la literatura.





Figura 37. Dispositivos impresos en 3D



Fuente. Autores

Para finalizar se compararon los resultados obtenidos de las pruebas experimentales y simulaciones realizadas con y sin dispositivo. En la Tabla 11 se presentan los dispositivos que generaron disminución de la resistencia aerodinámica en las pruebas experimentales en el túnel de viento.

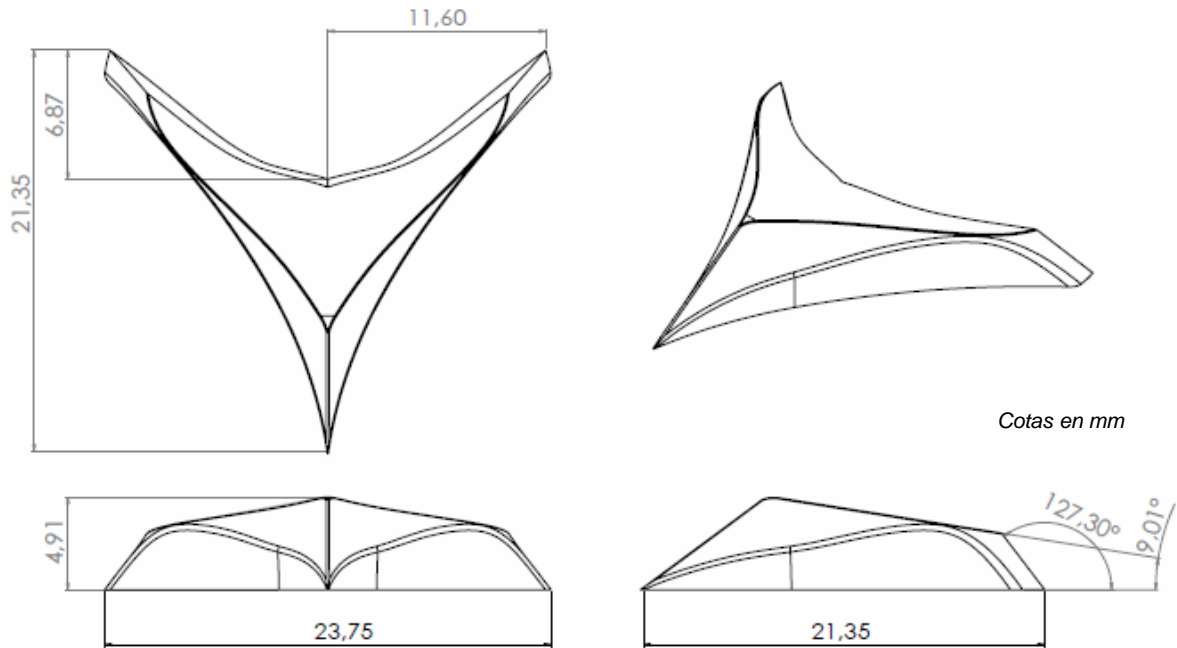
Tabla 11. Dispositivos óptimos en pruebas experimentales en túnel de viento

Nombre	VG Simple	VG Dobles	Carriles	Laterales
	1	2	3	4
Dispositivo				

Fuente. Autores

7.3.2 Generador de Vórtices (VG). Estos dispositivos presentan una forma triangular que busca generar vórtices, permitiendo direccionar el flujo de tal manera que se reintegre la capa límite. Se buscó replicar elementos similares utilizados en la aviación, en el automovilismo y ampliamente en contenedores de camiones, pero que fueran aplicables a este tipo de buses. Cabe aclarar que experimentalmente fueron realizadas varias pruebas con diferentes combinaciones en cuanto a la posición, presentando en este trabajo las de mejor resultado.

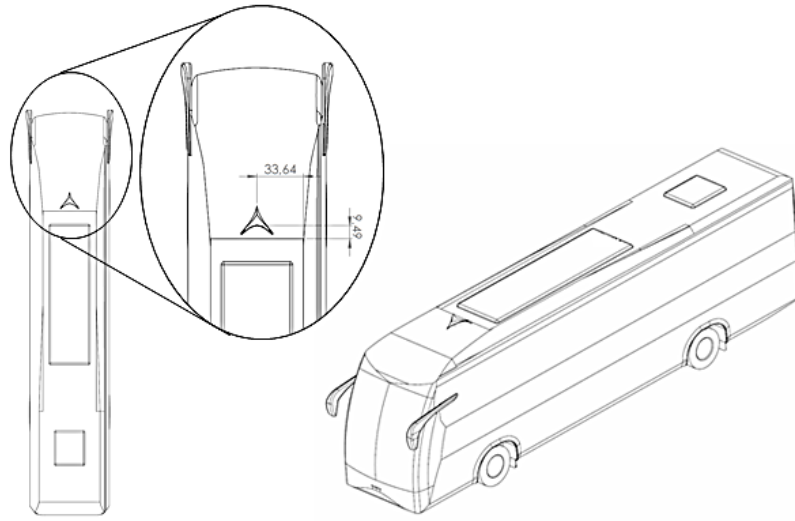
Figura 38. Planos de los Generadores de Vórtices



Fuente. Autores

7.3.2.1 Generador de Vórtices Simple (VG Simple) – Dispositivo 1. El VG simple o dispositivo 1 se localiza en la parte superior final de la joroba del bus, coincidiendo con los planos de simetría tanto del VG como del modelo ...Figura 39..., con este dispositivo se deseaba generar vorticidad que revirtiera el desprendimiento de la capa límite, lo cual se demostró con las pruebas de visualización experimentales y de simulación, además de esto el dispositivo redujo el C_{D-Bus} (Coeficiente de Drag del Bus) aproximadamente 7.09% en pruebas experimentales en túnel de viento, respecto a resultados de las simulaciones el VG Simple no reduce el C_{D-Bus} , posiblemente debido a una mala calidad de las mallas en la zona del dispositivo, por lo que la validación experimental no fue del todo satisfactoria.

Figura 39. Disposición del dispositivo 1 en el modelo

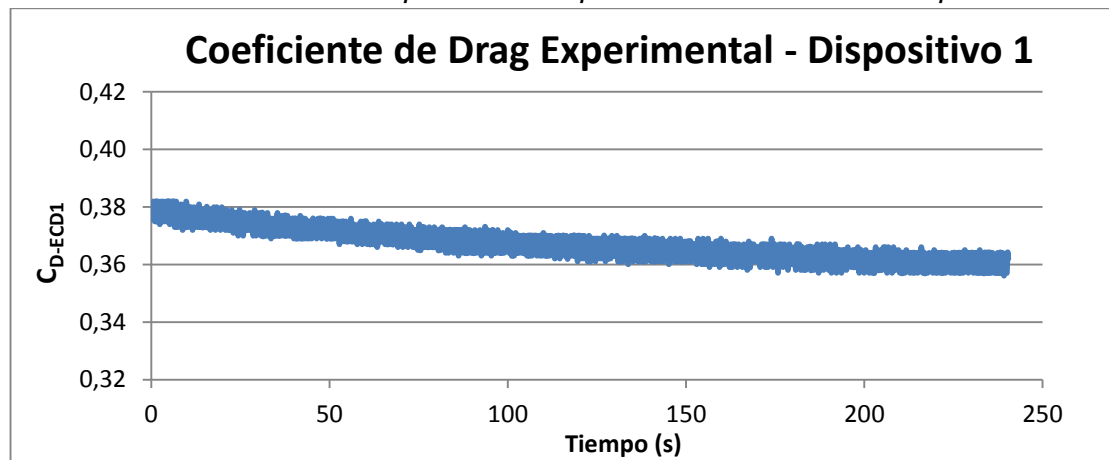


Fuente. Autores

Cotas en mm

Durante las pruebas experimentales para determinar la resistencia al avance con el dispositivo 1 se registraron datos durante 240,4 s que representaron 1203 valores de fuerza, de los cuales se obtuvo un valor máximo, mínimo y promedio del C_{D-ECD1} (Coeficiente de Drag – Experimental con Dispositivo 1), estos valores fueron ajustados por Blockage ratio. La Gráfica 11, muestra la variación de los datos del Coeficiente de Drag corregidos en el dominio del tiempo, para este dispositivo se obtuvo un valor máximo de 0,3819, un valor mínimo de 0,3561, y un valor promedio que corresponde al C_{D-ECD1} de 0,3671, estos tres valores son menores al C_{D-ESD} (0,3951), lo que significa una reducción efectiva en el C_{D-Bus} de aproximadamente 7,0891% en pruebas experimentales en túnel de viento.

Gráfica 11. Resultados Experimentales para las Pruebas con el Dispositivo 1



Fuente. Autores

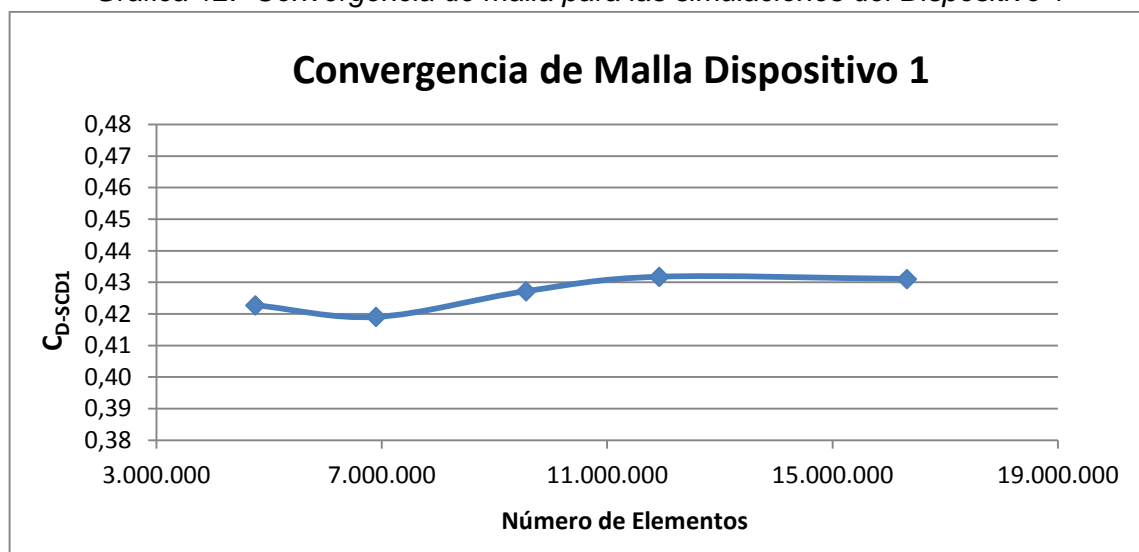
Tabla 12. Resultados datos experimentales

Datos Experimentales					Correccion Blockage		
Prueba N°	Fuerza Prom (N)	C_{D-ECD1} Max	C_{D-ECD1} min	C_{D-ECD1} Prom	C_{D-ECD1} Max	C_{D-ECD1} min	C_{D-ECD1} Prom
1	3,7008	0,3938	0,3672	0,3785	0,3819	0,3561	0,3671

Fuente. Autores

Se realizaron cinco simulaciones con diferente número de elementos por malla, estas fueron desarrolladas bajo el dominio con sección transversal del túnel de viento, para así ser comparados los resultados respecto a pruebas experimentales y a la simulación optima con este mismo dominio. Con la malla de 11.925.462 elementos solo se realizaron 726 iteraciones por lo que se escogió la malla con 16.320.252 elementos como la malla optima ya que con esta se realizaron 2308 iteraciones lo que asegura un mayor nivel de convergencia para el Coeficiente de Drag y residuales, esta malla posee un promedio de $Y+$ de 3,8345, 15 capas de prismas y como resultado un C_{D-SCD1} (Coeficiente de Drag – Simulación con Dispositivo 1) de 0,4311 que corresponde a un error porcentual de 17,43% respecto al coeficiente experimental C_{D-ECD1} (0,3671) y con respecto al coeficiente de simulación C_{D-STSD} (0,4131) de 4,35%, y un error porcentual de 0,16% respecto a la malla con número de elementos de 11.925.462., la información de la malla optima se podrá encontrar en el Anexo D.

Gráfica 12. Convergencia de malla para las simulaciones del Dispositivo 1



Fuente. Autores

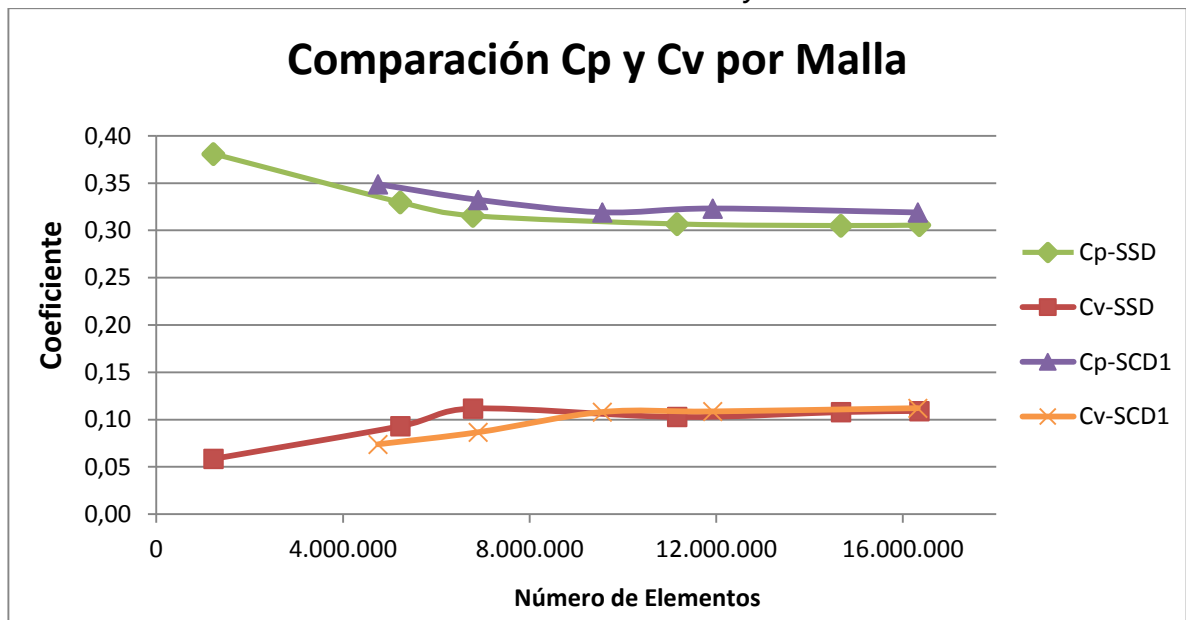
Tabla 13. Valor del C_{P-SCD1} , C_{V-SCD1} y C_{D-SCD1} respecto al número de elementos de las mallas simuladas y Error porcentual respecto al C_{D-ECD1} 0,3671 y C_{D-STSD} 0,4131

Número de Elementos	C_{P-SCD1}	C_{V-SCD1}	C_{D-SCD1}	Error (%) C_{D-ECD1}	Error (%) C_{D-STSD}	Error Porcentual entre Mallas (%)	
4.752.087	0,3489	0,0739	0,4228	15,16	2,34	0,89	1,91
6.898.631	0,3323	0,0867	0,4190	14,15	1,44		
9.559.593	0,3192	0,1080	0,4272	16,37	3,41	1,06	0,16
11.925.462	0,3231	0,1086	0,4318	17,62	4,52		
16.320.252	0,3190	0,1121	0,4311	17,43	4,35		

Fuente. Autores

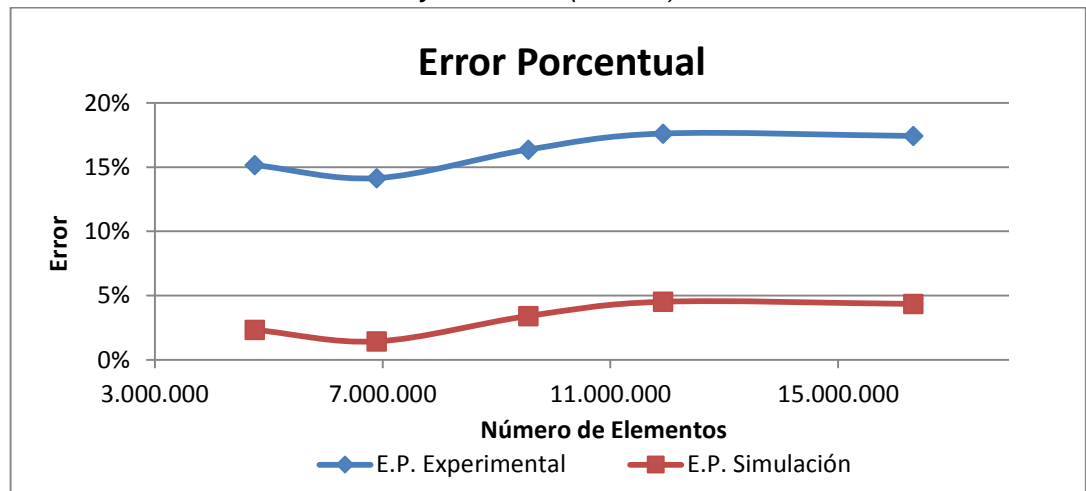
La Gráfica 13 es una comparación entre las mallas simuladas para el dominio con sección transversal del túnel de viento y dispositivo 1, de acuerdo a los valores de los coeficientes de presión y viscosidad. En esta, se observa que los coeficientes de viscosidad son muy similares para las mallas de mayor número de elementos, sin embargo, para los coeficientes de presión se mantiene una pequeña diferencia a lo largo de la gráfica siendo el C_{P-SCD1} mayor que el C_{P-SSD} , esto puede ocurrir por el menor número de capas de primas y la baja calidad de la malla sobre el dispositivo 1 ...Anexo D... representando estas regiones de forma incorrecta o imprecisiones del modelo de turbulencia, lo cual incurre en el error porcentual respecto a los Coeficientes de Drag con los que son comparados.

Gráfica 13. Comparación de los coeficientes C_{P-SCD1} , C_{V-SCD1} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas y la Gráfica 9



Fuente. Autores

Gráfica 14. Error porcentual entre los datos de Coeficiente de Drag experimental (C_{D-ECD1}) y simulado (C_{D-SCD1})

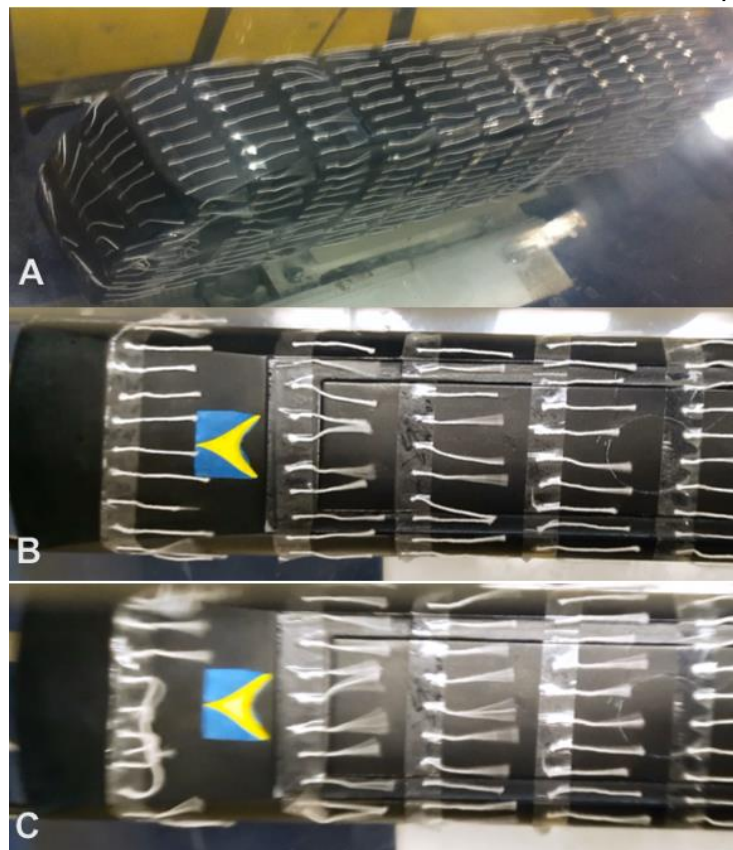


Fuente. Autores

En la Gráfica 14 se muestra la diferencia entre el error porcentual debido a las pruebas experimentales y de simulación, demostrando así, que las simulaciones hechas con este dispositivo tienen una variación importante respecto a los resultados experimentales, a partir de esto, se podría cambiar el modelo de turbulencia a SST $k-\omega$ con el fin de identificar cambios o reducción de los coeficientes, al tener una mayor precisión sobre la superficie del bus.

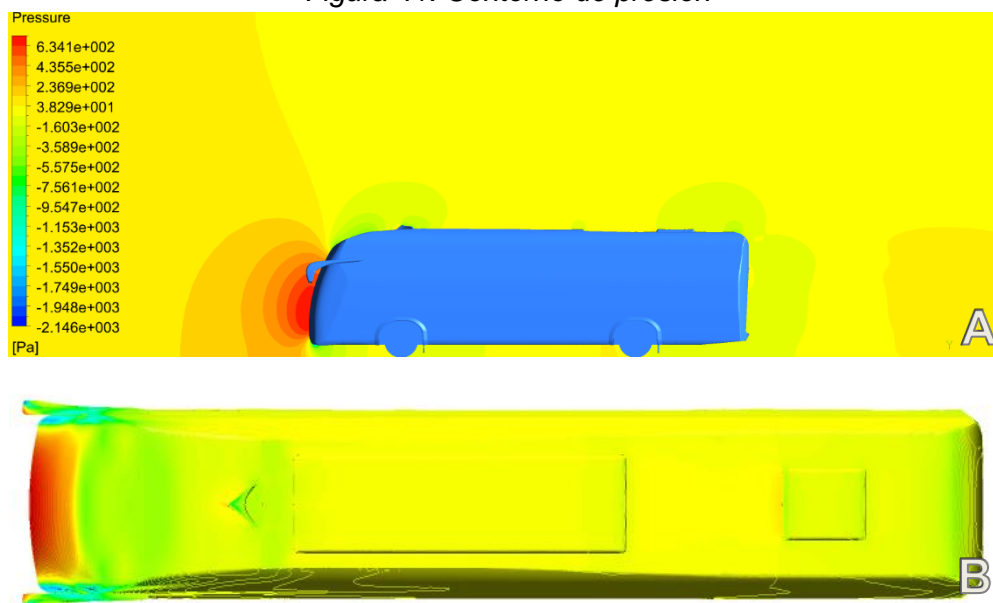
A continuación, se presentan los resultados de visualización de las pruebas experimentales y simulación para el dispositivo 1. El procedimiento para Tufts fue el seleccionado como método de visualización experimental, del cual se presentan los resultados en la Figura 40, los hilos en la prueba sin dispositivo muestran un comportamiento aproximadamente lineal con una leve turbulencia sobre el final de la joroba del bus ...Figura 40 A..., esta leve turbulencia aumenta con el VG simple tanto atrás como delante de él, confirmando así la hipótesis de que dicho dispositivo funciona como generador de vórtices, en la Figura 40 B. se observa que el movimiento de los hilos ubicados detrás del dispositivo aumenta considerablemente, la fotografía de la Figura 40 C., es un registro tomado después de varios minutos en que el túnel de viento donde ya se ha estabilizado la velocidad del flujo de aire, en esta se observa que la frecuencia de movimiento sobre los hilos ha aumentado considerablemente hasta la tercera hilera de tufts detrás del dispositivo, sin embargo el efecto más notorio se aprecia adelante del dispositivo, donde los hilos alcanzaron una vibración tal que se enredaron entre ellos.

Figura 40. Prueba de visualización de Tufts del modelo con dispositivo 1



Fuente. Autores

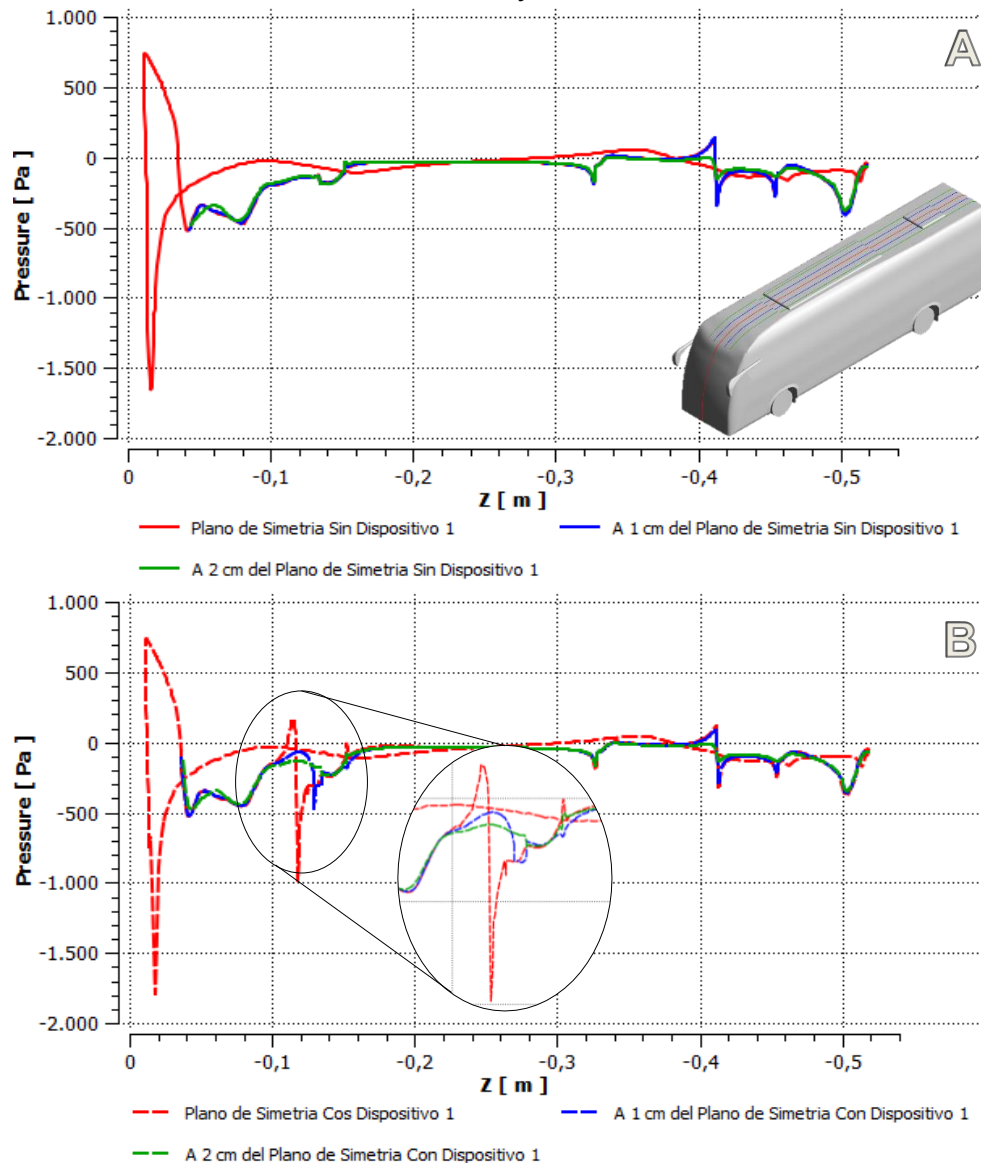
Figura 41. Contorno de presión



Fuente. Autores

La Figura 41, muestra contornos de presión sobre el plano de simetría y el bus, donde se puede notar un color verde intenso delante, sobre y detrás del dispositivo 1, cuyo rango varía entre -7.561×10^2 Pa y -1.603×10^2 Pa, estas zonas de color verde son notorias en las Figuras 40 A, B, por esto se hace uso de la Gráfica 16, que representan la presión en el superficie del bus sobre polylines ubicadas en el plano de simetría, a 1cm y 2cm de este; la polyline sobre el plano de simetría representa la presión arriba y debajo del bus, sin embargo como nuestro interés es conocer el cambio de presión debida al dispositivo 1 para las polylines a 1cm y 2cm del plano de simetría solo se tomó la parte superior del bus.

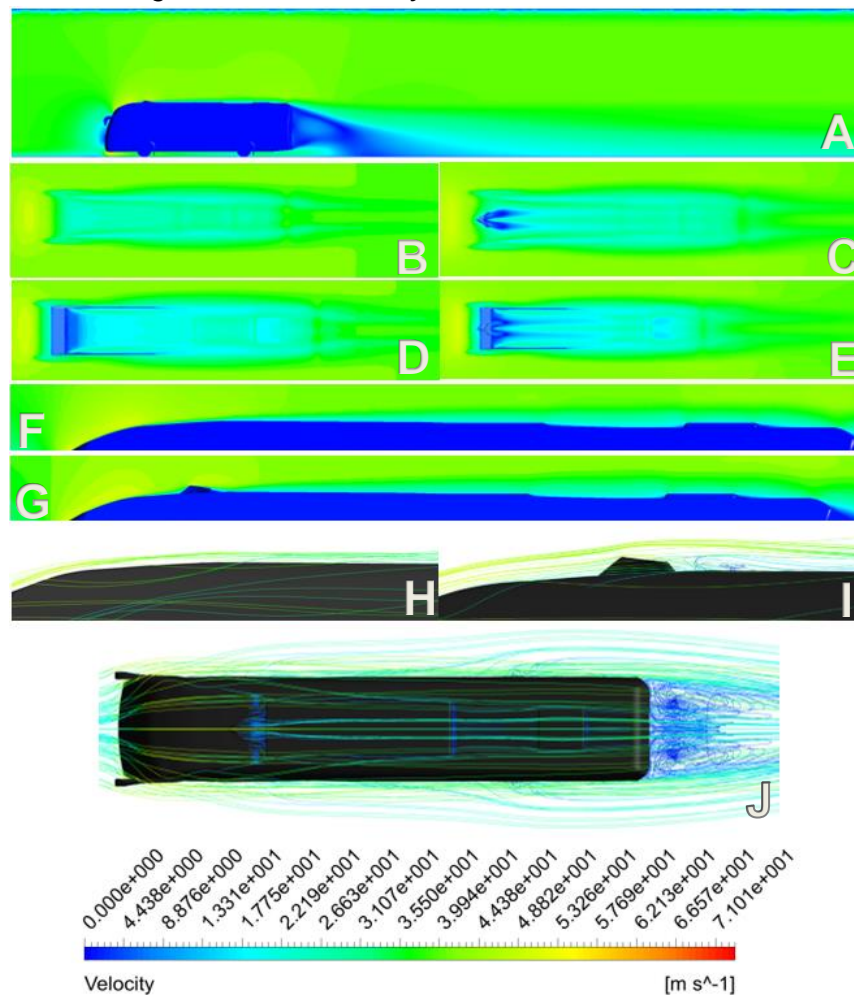
Gráfica 15. Presión sobre el plano superior del bus respecto a polylines en plano de simetría a 1cm y 2cm de este



Fuente. Autores

La Gráfica 16 A. representa la presión en la superficie del bus sin dispositivo y la Gráfica 16 B. muestra la presión sobre la superficie del bus con el Dispositivo 1, en esta se realiza un zoom en la alteración de presión generado por el VG simple. La línea roja a trazos ubicada sobre el plano de simetría presenta dos picos que son el producto del cambio de presión, el primer pico alcanza un valor máximo aproximado de 200 Pa siendo la parte delantera o punta del VG, el segundo pico alcanza aproximadamente un valor mínimo de -1000 Pa en la parte trasera del VG, este cambio de presión produce succión de aire generando vórtices ...Figura 42 I, J..., la línea azul a trazos alejada a 1cm del plano de simetría presenta al igual que la línea roja a trazos unos picos pero de menor magnitud, aun así esto representa turbulencia; la línea verde a trazos alejada a 2cm del plano de simetría presenta una variación mucho menor que las líneas roja y azul a trazos, sin embargo respecto a la línea verde continua existe una breve variación en la parte final del VG.

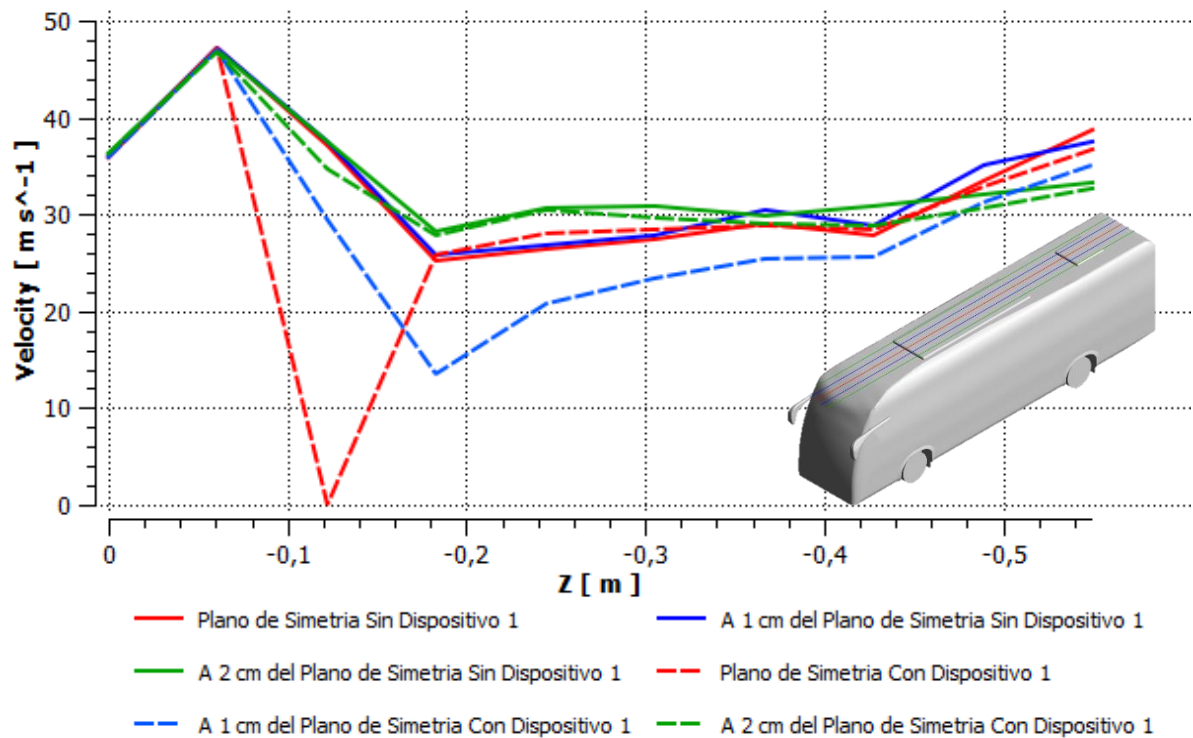
Figura 42. Contornos y streamline de Velocidad



Fuente. Autores

La Figura 42., enseña contornos y streamline de velocidad sobre planos que intersectan el dispositivo 1. En la Figura 42 C, E., se representan contornos a 15cm y 14.8cm del suelo respectivamente, en estas se observa el cambio de velocidad sobre el plano superior del bus debido al dispositivo 1, con respecto a las Figuras B y D, siendo esta otra prueba de la generación de vorticidad. En las Figuras G y H se muestra por medio de streamline la generación de vórtices detrás del VG respecto a la Figura F, en la cual no hay dispositivo. La Gráfica 17 es la velocidad medida en líneas en el plano de simetría, a 1cm y a 2cm de este, todas a 15 cm del suelo, no se usan polylines debido a que la velocidad sobre el bus es cero.

Gráfica 16. Velocidad sobre el plano superior del bus respecto a líneas en plano de simetría, a 1cm y 2cm de este.

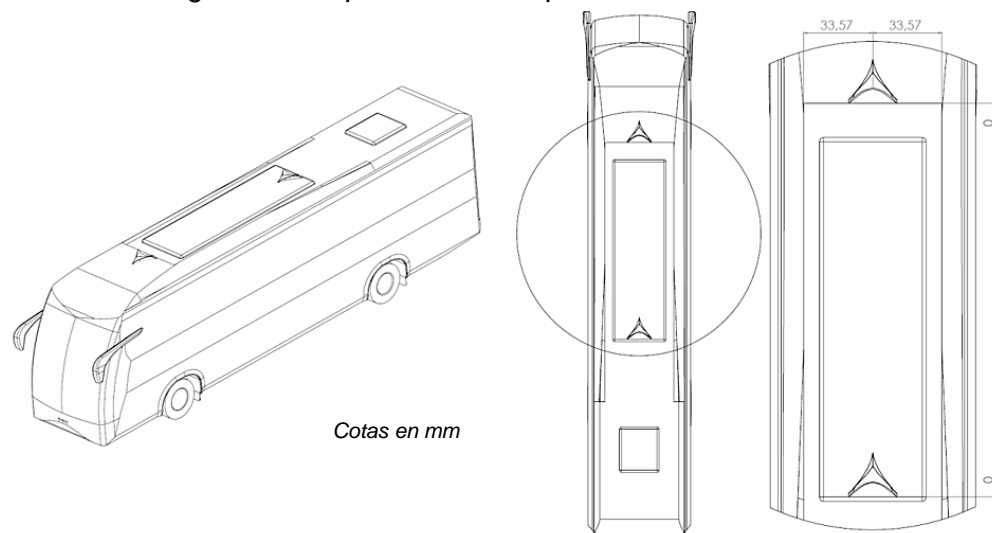


Fuente. Autores

La línea roja a trazos tiene una caída de velocidad a cero m/s en 12cm ya que en este punto atraviesa el VG, en cuanto a la línea azul a trazos el valor de velocidad mínimo se debe a su proximidad con el dispositivo 1. La línea a trazos ubicada sobre el plano de simetría muestra el aumento de velocidad con respecto a la línea continua que corresponde al modelo sin dispositivo desde los 18cm hasta los 42cm, a partir de este punto la línea roja a trazos se comporta de la misma forma que las demás líneas a trazos las cuales siempre presentan una velocidad menor, siendo estas las correspondientes al modelo con dispositivo alejadas del plano de simetría.

7.3.2.2 Generadores de Vórtices Dobles (VG Dobles) – Dispositivo 2. Este dispositivo es exactamente igual al anterior con la diferencia que le fue agregado un generador de vórtices más en el centro de la sección posterior del aire acondicionado del modelo ...Figura 43..., se implementaron los VG de esta forma observando el resultado obtenido con el dispositivo anterior, la intención al agregar este nuevo generador de vórtices fue alterar la estela turbulenta que se encontraba detrás del aire acondicionado sin dispositivo. Se pretendía que así, la reducción del C_D fuera mayor, aunque finalmente se presentó un dato muy similar con una diferencia de 0,71% por encima del resultado del dispositivo 1.

Figura 43. Disposición del dispositivo 2 en el modelo



Cotas en mm

Fuente. Autores

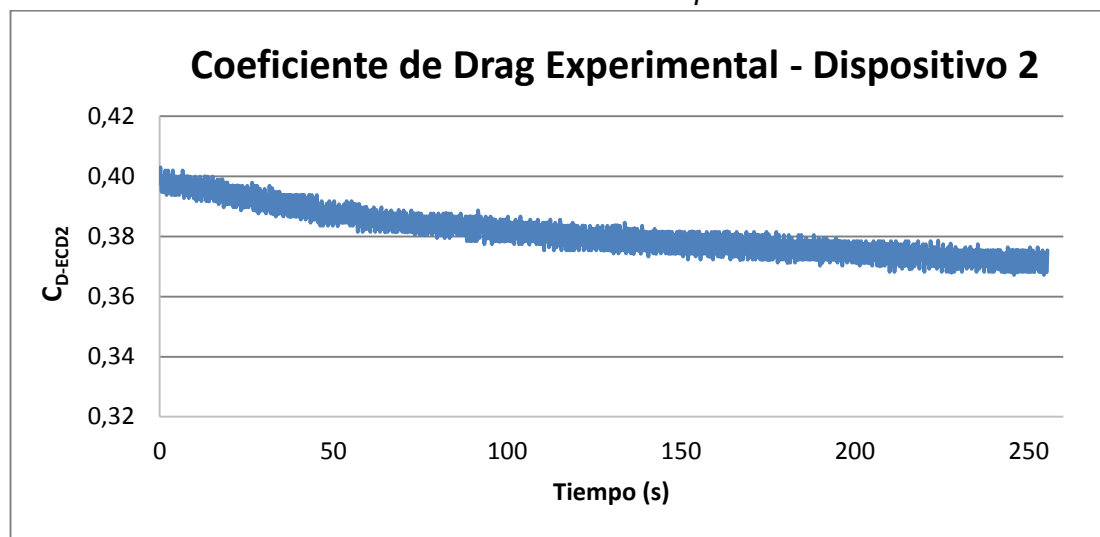
La Gráfica 17. presenta los resultados de la prueba experimental de fuerza realizada para esta combinación de los dispositivos, estos datos fueron registrados por un poco más de cuatro minutos obteniendo 1250 datos a partir de la estabilización de la velocidad del flujo en el túnel de viento, la cual como se evidencia en el C_{D-ECD2} decayó ligeramente durante este ensayo; así como los demás resultados experimentales, estos fueron corregidos debido al bloqueo de la estela turbulenta, obteniendo que el dispositivo 2 reduce 6,18% el C_{D-Bus} .

Tabla 14. Resultados datos experimentales

Datos Experimentales				Corrección Blockage		
Fuerza Prom (N)	C_{D-ECD2} Max	C_{D-ECD2} min	C_{D-ECD2} Prom	C_{D-ECD2} Max	C_{D-ECD2} min	C_{D-ECD2} Prom
3,7266	0,4030	0,3672	0,3812	0,3908	0,3561	0,3697

Fuente. Autores

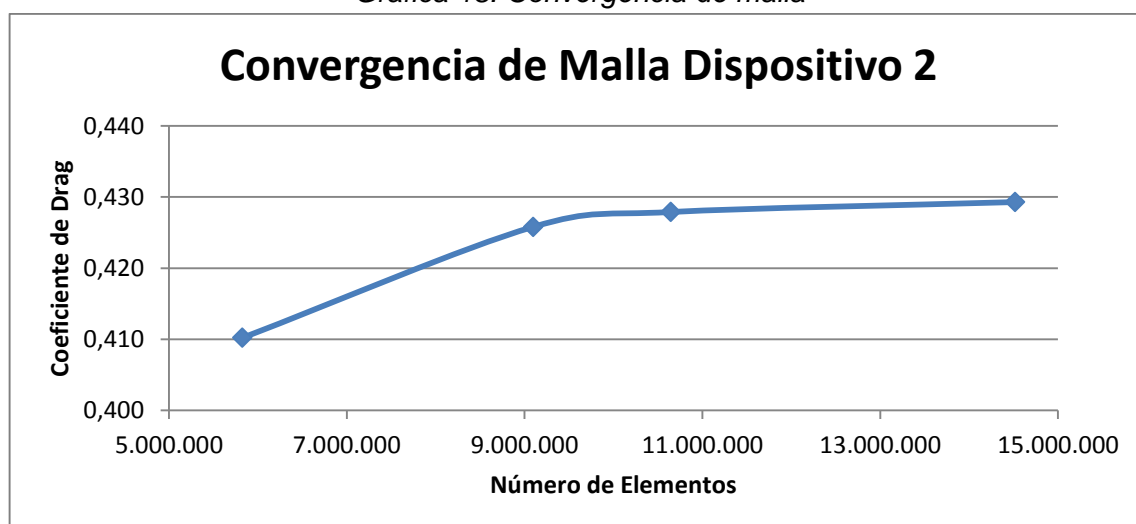
Gráfica 17. Pruebas de fuerza del bus con el dispositivo 2 en túnel de viento



Fuente. Autores

El análisis de independencia de malla para este dispositivo se realizó mediante cuatro simulaciones, se eligió la malla de 14.518.623 estimando que su diferencia con respecto a una malla de mayor número de elementos sería muy cercana a cero ya que su diferencia con respecto a la malla anterior es de 0,31%, esta malla contó con 18 capas y un Y^+ de 4,28 resaltando que no se logró resolver *stairstep* en un pequeño sector sobre el dispositivo.

Gráfica 18. Convergencia de malla



Fuente. Autores

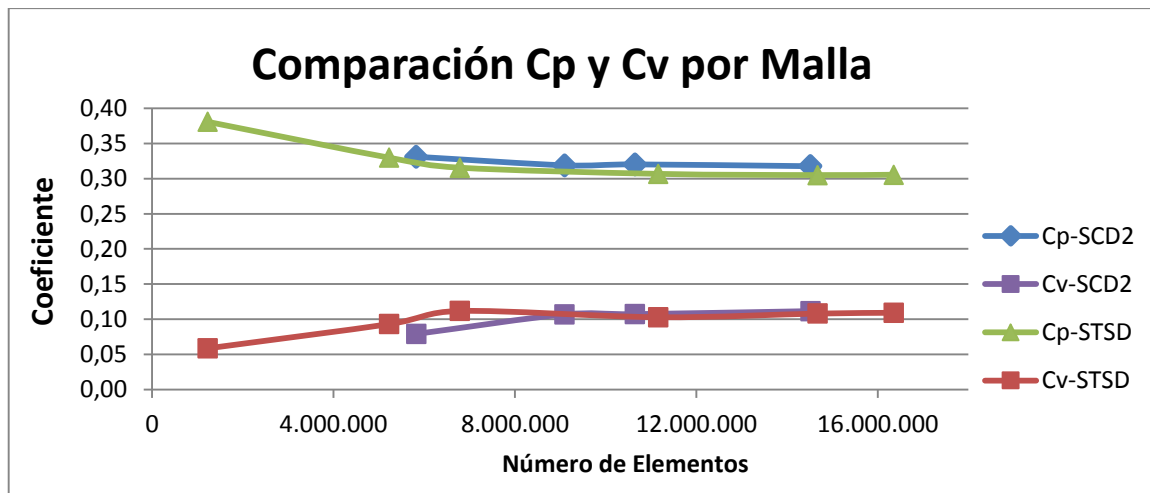
La comparación entre las simulaciones resulta en una diferencia de 3,92% mayor al CD-STSD, en la Gráfica 19., se observa un comportamiento similar al de los coeficientes obtenidos con el dispositivo 1, los CV se mantienen aproximadamente iguales, mientras que la diferencia entre los CP es menor. Al utilizar los dos VG's, computacionalmente se obtuvo una reducción mayor que la lograda por el dispositivo 1.

Tabla 15. Diferencia del C_D de las simulaciones del Dispositivo 2

Número de Elementos	C_{P-SCD2}	C_{V-SCD2}	C_{D-SCD2}	Error (%) C_{D-ECD2}	Error (%) C_{D-STSD}	Error Porcentual entre Mallas (%)	
5.824.562	0,3312	0,0790	0,4102	10,95	0,70	3,66	
9.095.083	0,3190	0,1068	0,4258	15,17	3,07		0,50
10.645.471	0,3203	0,1072	0,4279	15,74	3,58	0,31	
14.518.623	0,3177	0,1115	0,4293	16,12	3,92		

Fuente. Autores

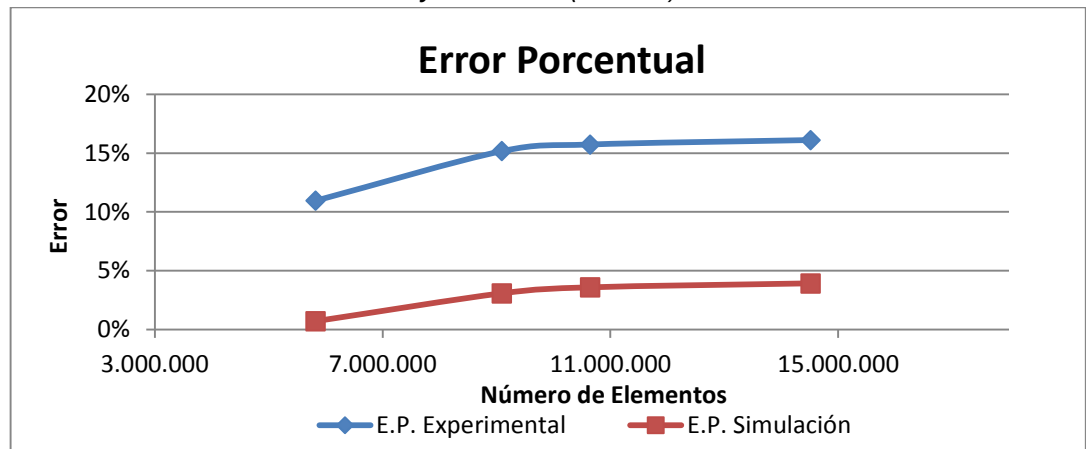
Gráfica 19. Comparación de los coeficientes C_{P-SCD2} , C_{V-SCD2} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas y la Gráfica 9



Fuente. Autores

En la Gráfica 20. Se encuentran el error porcentual entre los valores de simulación sin y con el dispositivo 2 y el error porcentual entre la simulación y experimentación con el dispositivo 2, se identificó que estos parámetros aumentaron de acuerdo a la calidad de la malla, logrando un error máximo de 16.12% respecto a la experimentación y 3.92% entre simulaciones ...Tabla 15....

Gráfica 20. Error porcentual entre los datos de Coeficiente de Drag experimental (C_{D-ECD2}) y simulado (C_{D-SCD2})



Fuente. Autores

Las pruebas experimentales de visualización fueron realizadas con tufts, estas permitieron observar que existió una leve turbulencia o desorden de los hilos detrás de ambos dispositivos, aunque fue más evidente detrás del dispositivo delantero como se muestra en la Figura 44 A, B., donde se enseña el desarrollo del flujo en dos instantes de tiempo, evidenciando que el flujo turbulento ocasiona finalmente que se crucen los hilos ubicados delante del VG de la joroba.

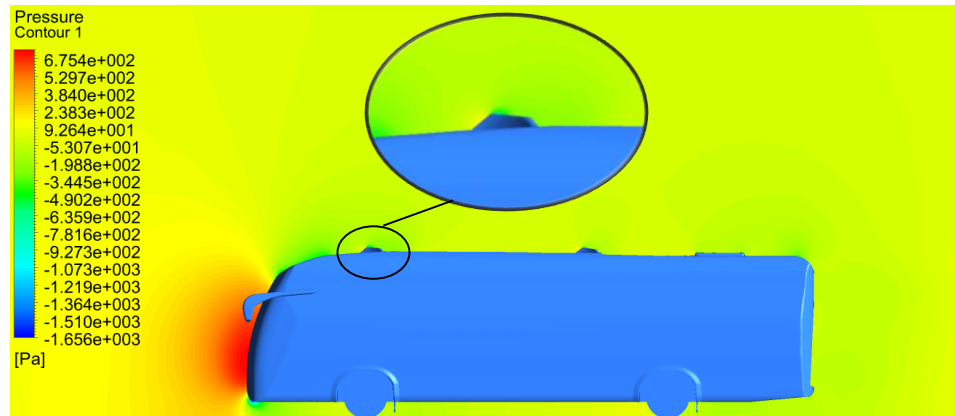
Figura 44. Pruebas del dispositivo 2 con Tufts en túnel de viento



Fuente. Autores

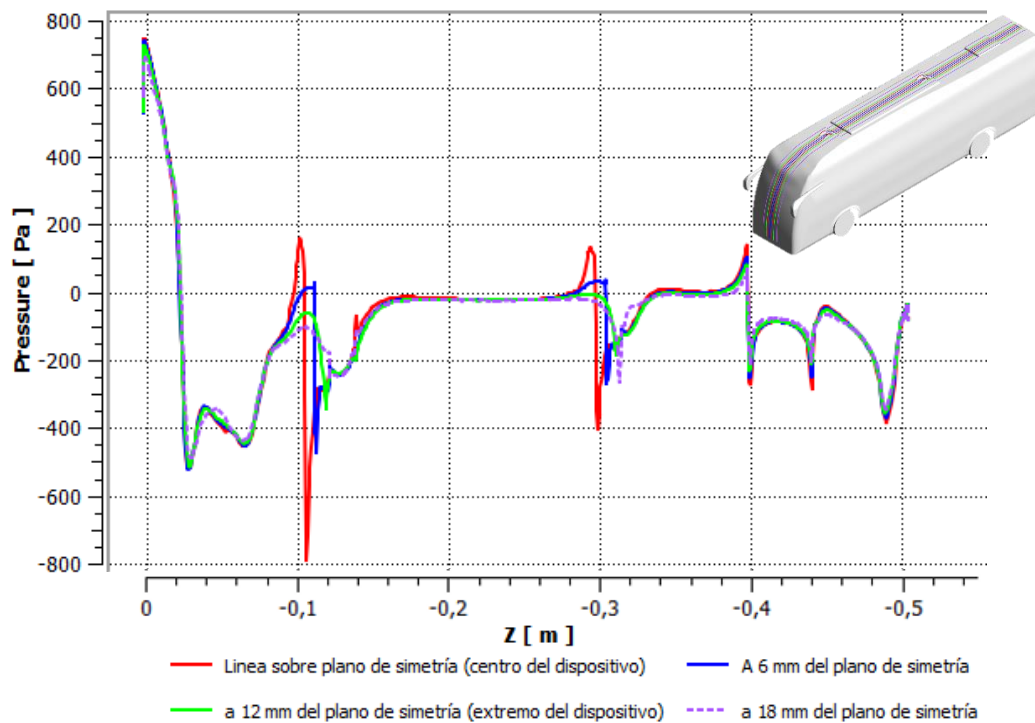
Los contornos de presión realizados mediante la simulación computacional permitieron observar alta presión en el segmento frontal de los dispositivos y baja presión en la región superior y trasera de los mismos, infiriendo que en estas zonas existe un ligero aumento de la velocidad dados los gradientes de presión, destacándose que es mayor el que se encuentra en el dispositivo delantero.

Figura 45. Contorno de presión en el plano de simetría del modelo con el dispositivo 2



Fuente. Autores

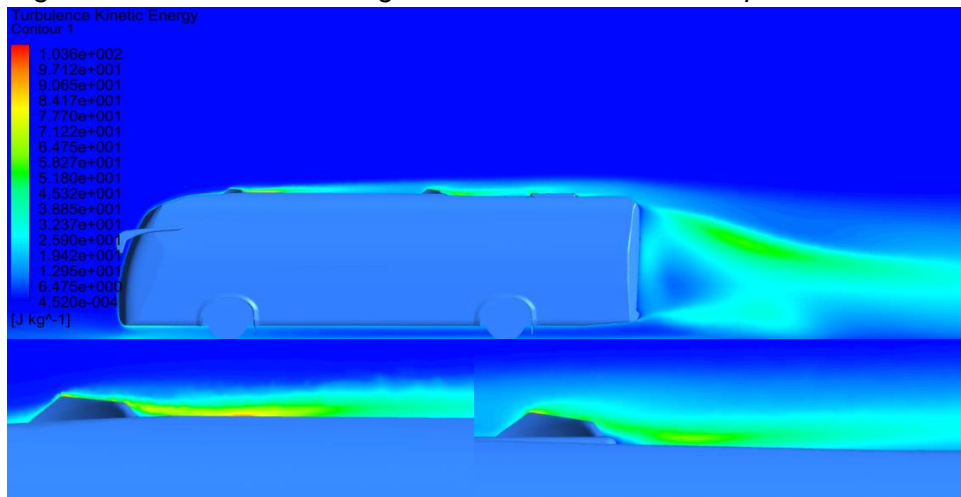
Gráfica 21. Presión sobre el modelo utilizando polylines



Fuente. Autores

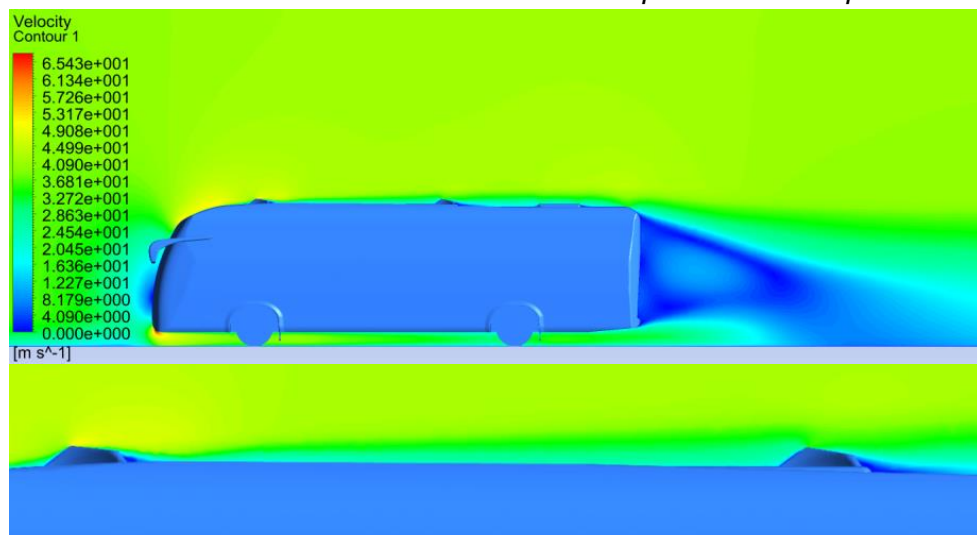
En la Gráfica 21., se encuentran resultados de presión sobre el modelo con el dispositivo 2, estas se obtuvieron realizando polylines en el plano de simetría, a un cuarto del dispositivo, en el extremo del dispositivo y a 18 mm del plano de simetría. Con esto se identificó el mismo efecto provocado por el dispositivo 1 en la sección delantera, además se presenta un comportamiento similar en el VG trasero, aunque con menor magnitud. En esta ocasión los cambios de presión generados por los VG's representan aumento de la velocidad, como se puede corroborar en los contornos de velocidad ...Figura 47..., los cuales muestran un valor mayor en el VG ubicado al frente del modelo.

Figura 46. Contorno de energía cinética turbulenta en el plano de simetría



Fuente. Autores

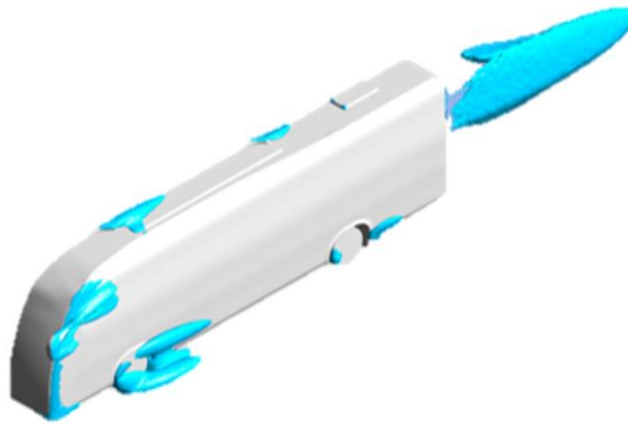
Figura 47. Contorno de velocidad del modelo con el dispositivo 2 en el plano de simetría



Fuente. Autores

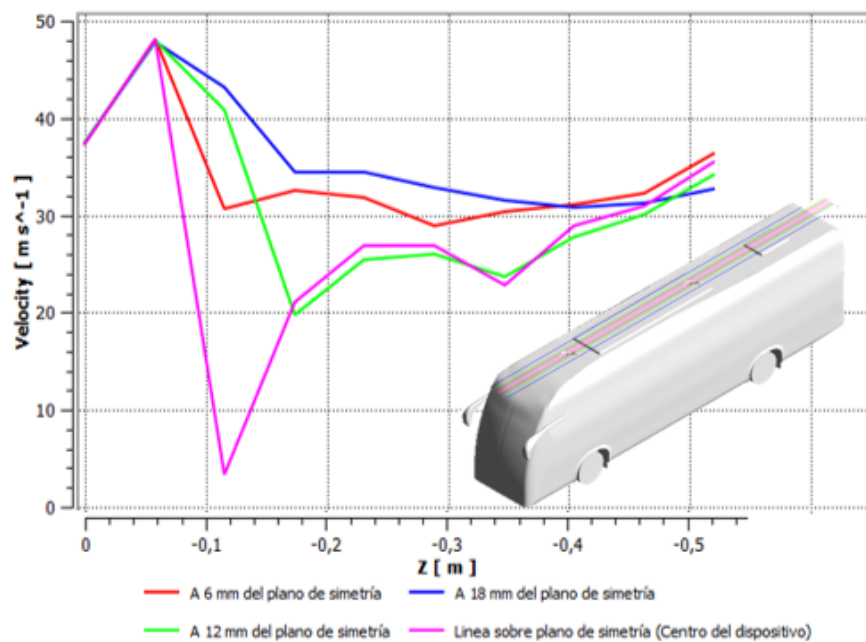
Con los VG's Dobles se generaron regiones turbulentas como se muestra en la Figura 46., que expresa la energía cinética turbulenta en un plano de simetría evidenciando valores más altos en la estela del dispositivo delantero, sin embargo, en esta ocasión estos valores de mayor energía representan menor estela turbulenta que la generada por el segundo dispositivo como se observa en el contorno de velocidad ...Figura 47.... La Figura 48., representa regiones de alta turbulencia y el comportamiento del flujo tras los dispositivos evidenciando características de vórtices.

Figura 48. Energía Cinética Turbulenta a 260 J/Kg



Fuente. Autores

Gráfica 22. Velocidad sobre el plano superior del bus

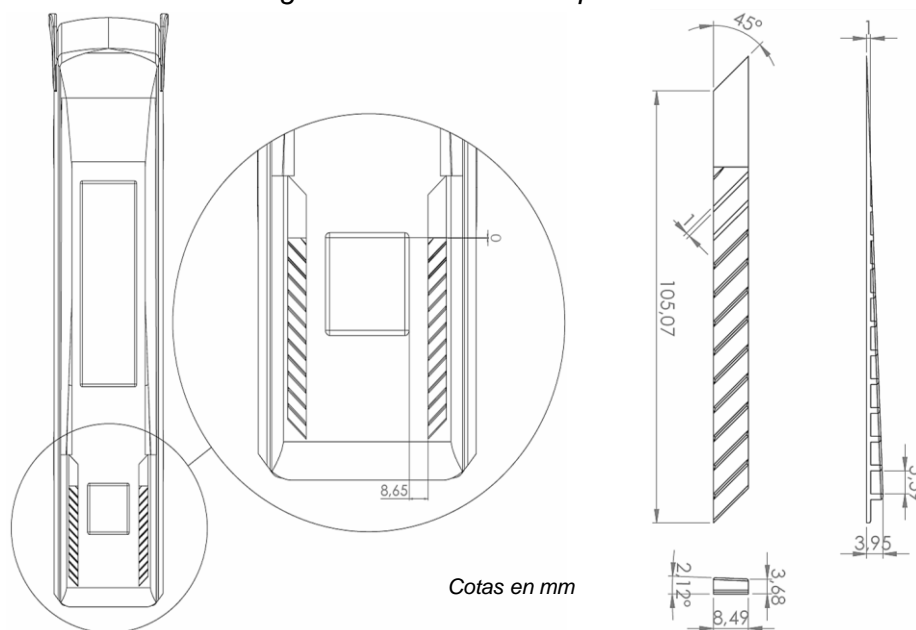


Fuente. Autores

En la Gráfica 22, se observa que el comportamiento de la velocidad para el VG delantero es el mismo comparado con el Dispositivo 1, existe una caída de velocidad delante de los dispositivos y detrás asciende sin superar la corriente libre, el VG trasero ubicado en los 0,35m aproximadamente de igual forma presenta disminución de la velocidad frente al dispositivo y aceleración después del mismo, para ambos se evidencia que la estela tras ellos aumenta su velocidad hasta lograr valores muy cercanos a 37 m/s, además se aprecia que la velocidad en la línea azul, la más alejada del plano de simetría, presenta una trayectoria descendente durante casi toda la longitud del bus, en los últimos 10 cm aumenta un par de m/s pero finaliza teniendo la menor velocidad entre las líneas graficadas, deduciendo que la menor velocidad de la estela de los dispositivos se da en los extremos y hacia el centro se encuentran los valores más elevados.

7.3.3 Carriles – Dispositivo 3.

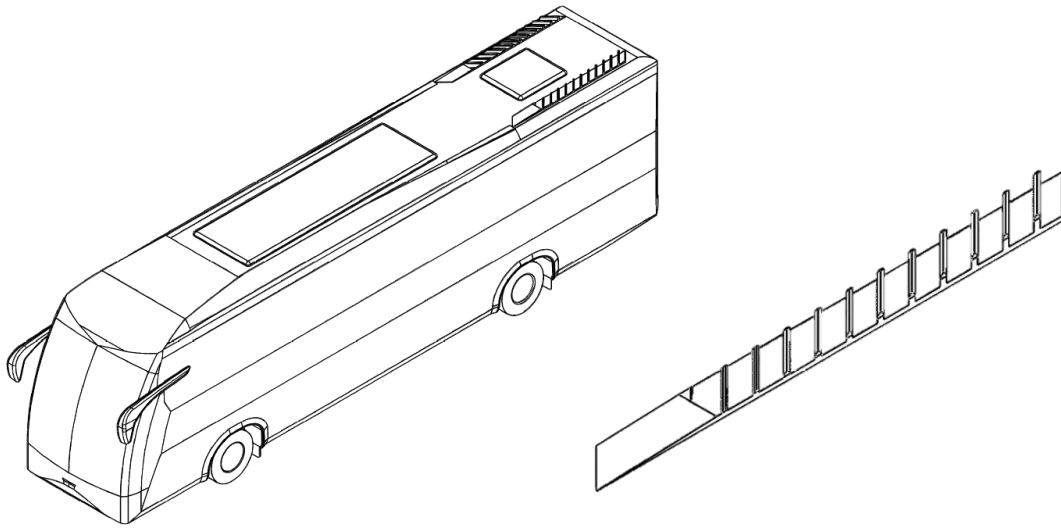
Figura 49. Planos del dispositivo



Fuente. Autores

Los Carriles son dos placas ubicadas en el extremo posterior del techo del modelo ...Figura 50..., las cuales poseen una serie de tabiques a 45° con el objetivo de direccionar hacia el centro el flujo turbulento identificado tanto en la simulación como en la experimentación sin dispositivo, allí se presentaron vórtices longitudinales que aumentaban el tamaño de la estela turbulenta al alejarse del bus, la intención fue integrar estos vórtices en dicha estela.

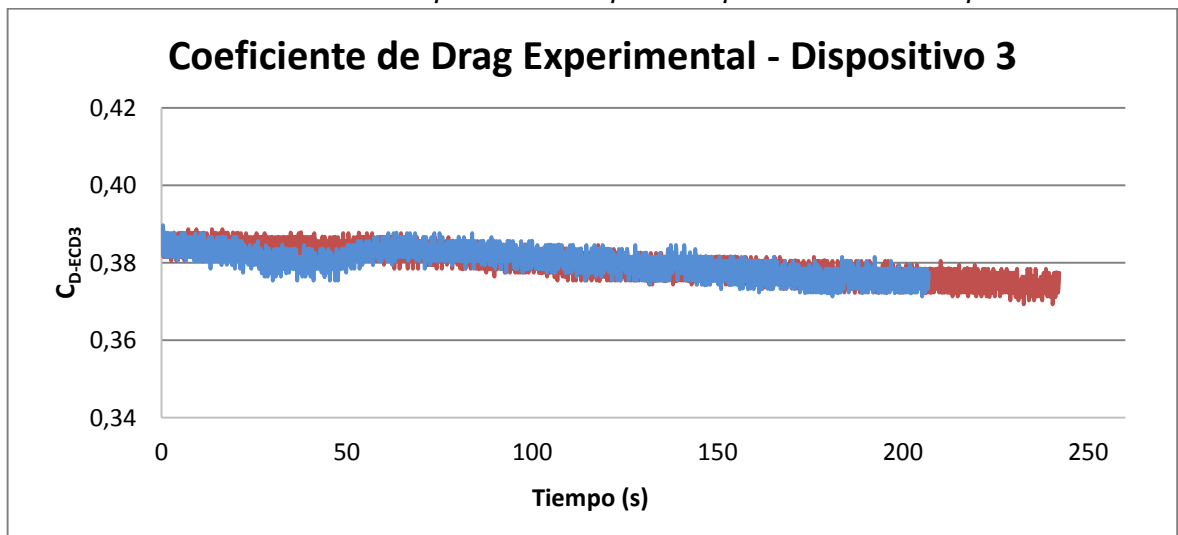
Figura 50. Disposición del Dispositivo 3 en el modelo



Fuente. Autores

Para las pruebas experimentales de fuerza se llevaron a cabo dos ensayos que arrojaron los resultados de la Gráfica 23., los cuales tuvieron una duración de 4 minutos a partir de la estabilización de la velocidad del flujo en el túnel de viento. Los resultados de ambos ensayos fueron promediados para determinar el valor del Coeficiente de Drag Experimental del Dispositivo 3 (C_{D-ECD3}), al cual se le realizó una corrección por Blockage ratio obteniendo un valor de referencia de 0,3684 ...Tabla 16..., esto representa una reducción de 6,75% con respecto al C_{D-Bus} .

Gráfica 23. Resultados experimentales para las pruebas con el Dispositivo 3



Fuente. Autores

Tabla 16. Resultados datos experimentales

Datos Experimentales					Corrección Blockage		
Prueba N°	Fuerza Prom (N)	C_{D-ECD3} Max	C_{D-ECD3} min	C_{D-ECD3} Prom	C_{D-ECD3} Max	C_{D-ECD3} min	C_{D-ECD3} Prom
1	3,7122	0,3887	0,3693	0,3797	0,3769	0,3581	0,3682
2	3,7164	0,3897	0,3713	0,3801	0,3779	0,3601	0,3687
Promedio	3,7143	0,3892	0,3703	0,3799	0,3774	0,3591	0,3684

Fuente. Autores

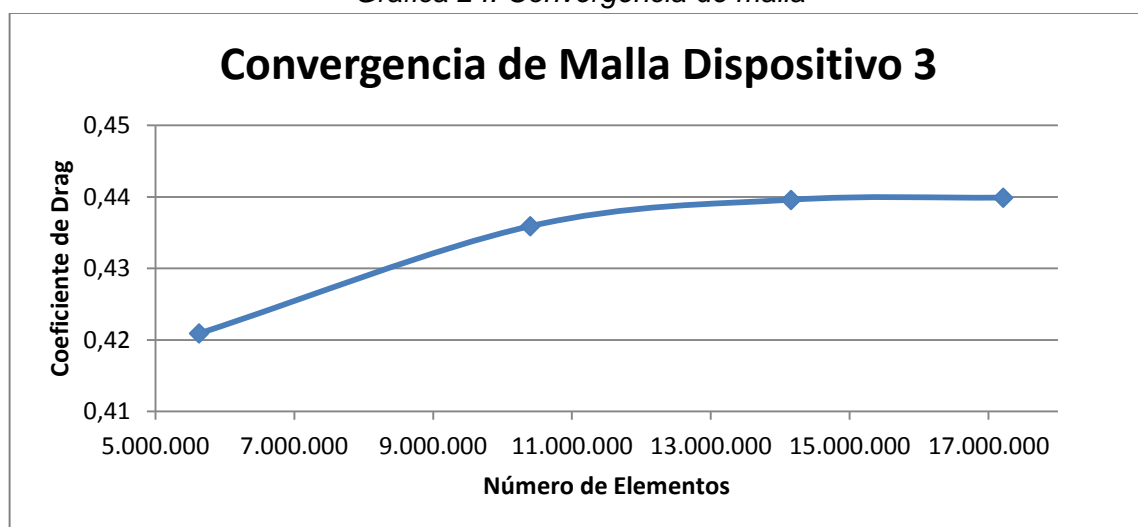
En cuanto a la simulación computacional se efectuó el análisis de independencia de malla con cuatro simulaciones, se determinó como optima la malla de 14.153.999 elementos en la cual se identifica la convergencia del C_{D-SCD3} como se observa en la Gráfica 23., esta malla posee 18 capas de prismas con un $Y+$ promedio de 4,09, la información adicional se encuentra en el Anexo D.

Tabla 17. Diferencia del C_D de las simulaciones del Dispositivo 3

Número de Elementos	C_{P-SCD3}	C_{V-SCD3}	C_{D-SCD3}	Error (%) C_{D-ECD3}	Error (%) C_{D-STSD}	Error Porcentual entre Mallas (%)	
5.629.863	0,3459	0,0750	0,4209	14,25%	1,89%	0,85%	3,44%
10.398.229	0,3248	0,1105	0,4359	18,32%	5,52%		
14.153.999	0,3237	0,1159	0,4396	19,33%	6,41%		0,06%
17.209.396	0,3235	0,1163	0,4399	19,41%	6,49%		

Fuente. Autores

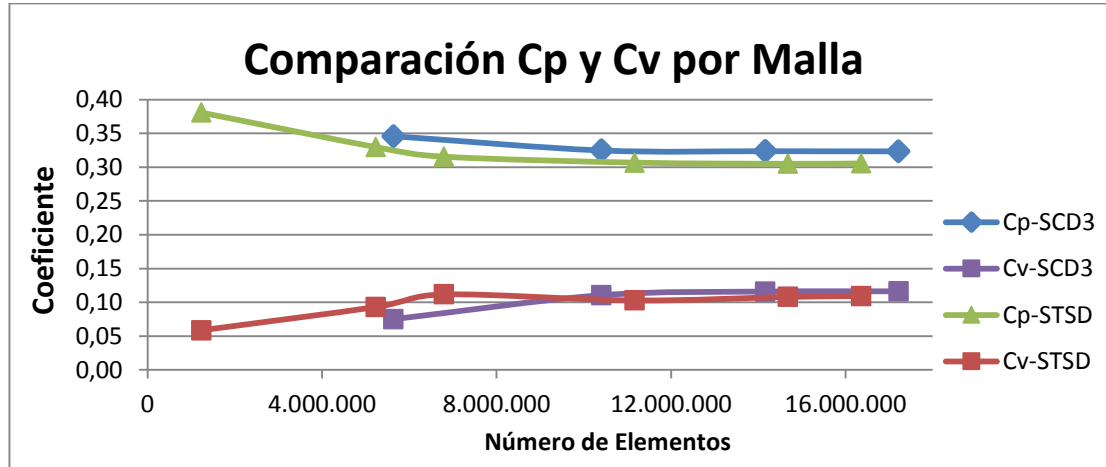
Gráfica 24. Convergencia de malla



Fuente. Autores

Las simulaciones realizadas para este dispositivo muestran un leve aumento en el Coeficiente por fuerzas viscosas a comparación de los dispositivos anteriores, el Coeficiente de presión muestra un comportamiento similar al observado en las gráficas de los VG´s siendo mayor al C_{D-STSD} , se observa que la principal alteración al Drag se debe a fuerzas de presión... Gráfica 24....

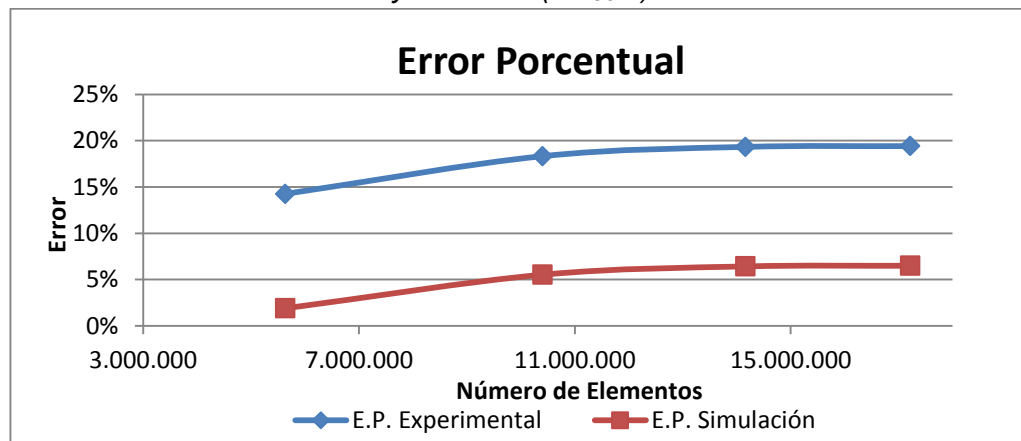
Gráfica 25. Comparación de los coeficientes C_{P-SCD3} , C_{V-SCD3} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas y la Gráfica 9



Fuente. Autores

El error porcentual entre las simulaciones óptimas sin y con el dispositivo 3 es de 6,41% y con respecto a la experimentación con Carriles es del 19,33%, el comportamiento de ambas comparaciones es proporcional aumentando el C_{D-SCD3} ...Gráfica 25....

Gráfica 26. Error porcentual entre los datos de Coeficiente de Drag experimental (C_{D-ECD2}) y simulado (C_{D-SCD2})



Fuente. Autores

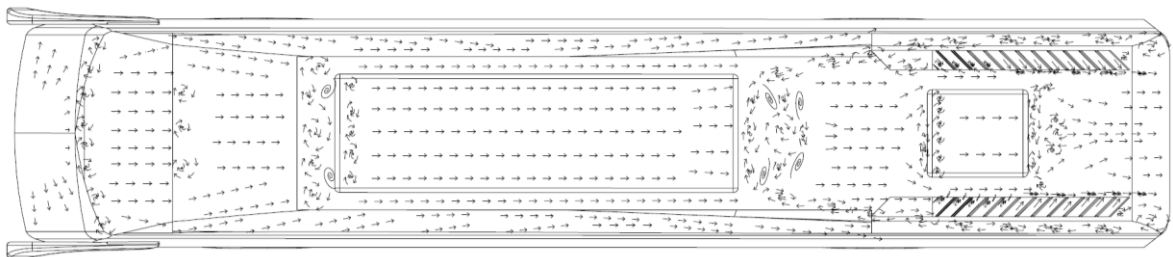
Durante la experimentación con los métodos de visualización utilizados se observó que con este dispositivo el aire se desplaza al centro del modelo ...Figura 52..., logrando la dirección del flujo deseada. Se identificaron estelas turbulentas como acumulación del aceite en el inicio de los dispositivos y detrás de los tabiques, nuevamente se evidenciaron vórtices detrás de la claraboya, aunque más cerca del centro del modelo y la prueba con tufts permitió identificar que persiste la turbulencia detrás de los Carriles ya que los hilos vibraban con alta frecuencia causando que se enredaran entre ellos...Figura 51....

Figura 51. Pruebas del dispositivo 3 en túnel de viento



Fuente. Autores

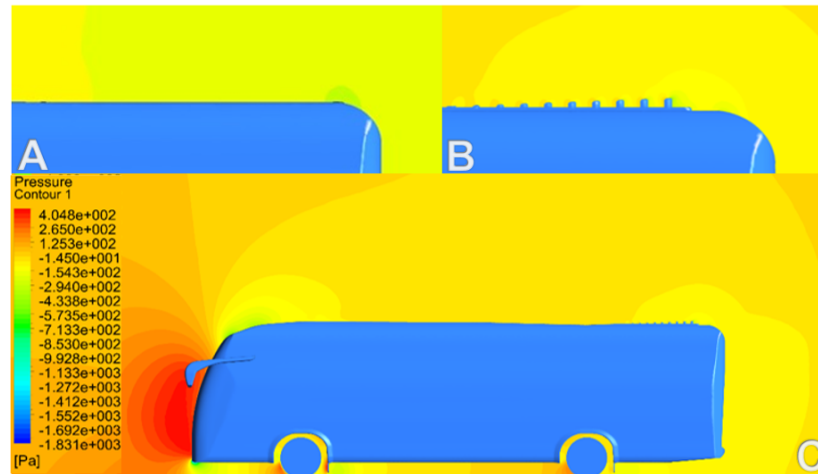
Figura 52. Interpretación del flujo sobre el modelo



Fuente Autores

Los resultados de la simulación computacional permitieron observar caída de la presión en la región donde se encuentra el dispositivo, sin embargo, se identifica que la presión en éste segmento es mayor en comparación con la presión existente sin dispositivo ... Figura 53 A, C..., en cada una de los tabiques que conforman los Carriles de flujo, se presentan puntos de mayor presión en el frente y menor presión al respaldo como se observa en la Figura 53 B.

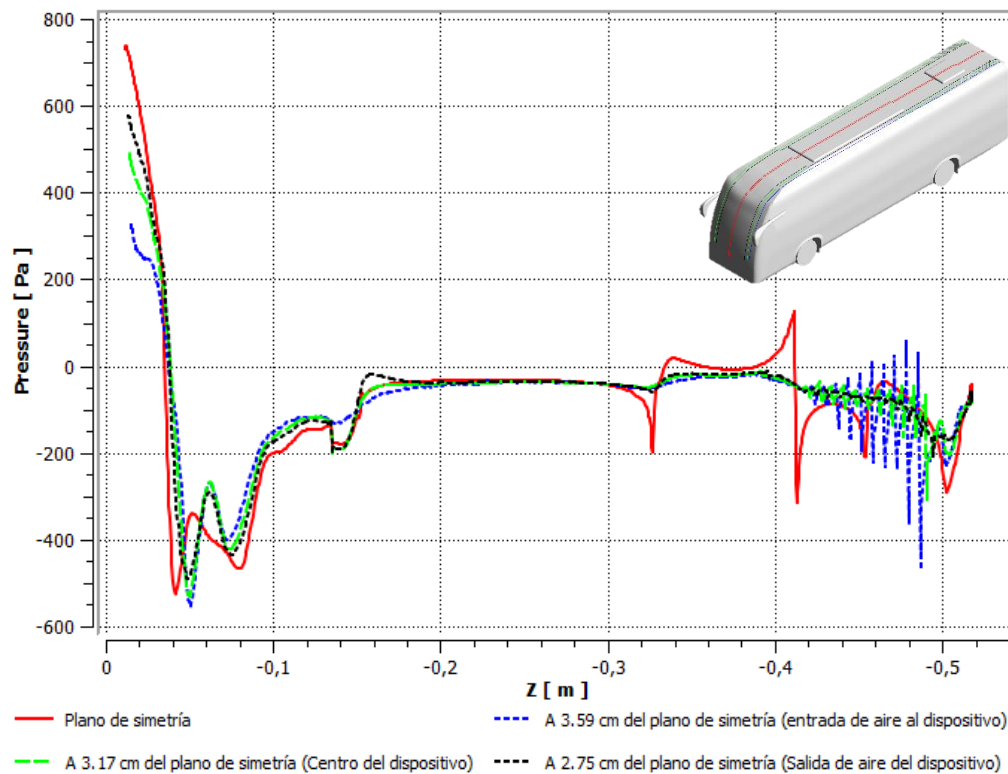
Figura 53. Contorno de presión sin y con Carriles



Fuente. Autores

La Gráfica 26., presenta datos de la presión sobre ciertas regiones del modelo usando polylines, estas se crearon en el plano de simetría, en el centro y los extremos laterales del dispositivo, fueron realizadas en la parte superior del bus siendo estas las superficies de interés para este análisis.

Gráfica 27. Presión sobre el modelo usando polylines

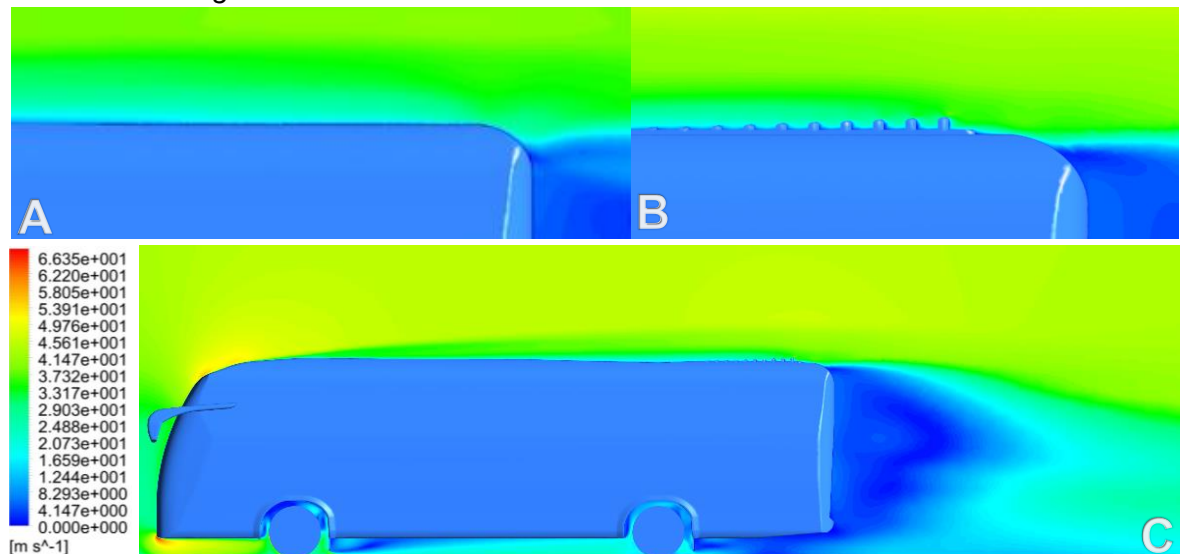


Fuente. Autores

Es posible observar altos gradientes de presión debido a los Carriles, resaltando que el cambio de presión es mayor al final del dispositivo, el gradiente de presión de mayor magnitud se encuentra en la entrada de aire al dispositivo ...Figura 58 C..., siendo esta zona la que se encuentra en el extremo lateral del modelo representada por la línea azul a trazos; de acuerdo a la línea negra a trazos se identificó que en la salida de aire de los tabiques el cambio de la presión es menor, por último, la línea roja permite establecer que la presión en el plano de simetría cambió con respecto a la Gráfica 15 A. del modelo sin dispositivo, al presentarse diferencias de presión mayores en la región tras la claraboya.

Mediante un plano lateral se observa baja velocidad del aire en la ubicación del dispositivo, especialmente detrás de los tabiques en donde se observaron pequeñas zonas con velocidad de 0 m/s, se encontró que en los últimos Carriles la velocidad ascendió a un valor cercano a la corriente libre y al compararse con el contorno de velocidad sin dispositivo de esta misma zona ...Figura 54. A, B... se identificó que el flujo se adhiere.

Figura 54. Contorno de velocidad sobre el modelo con Carriles

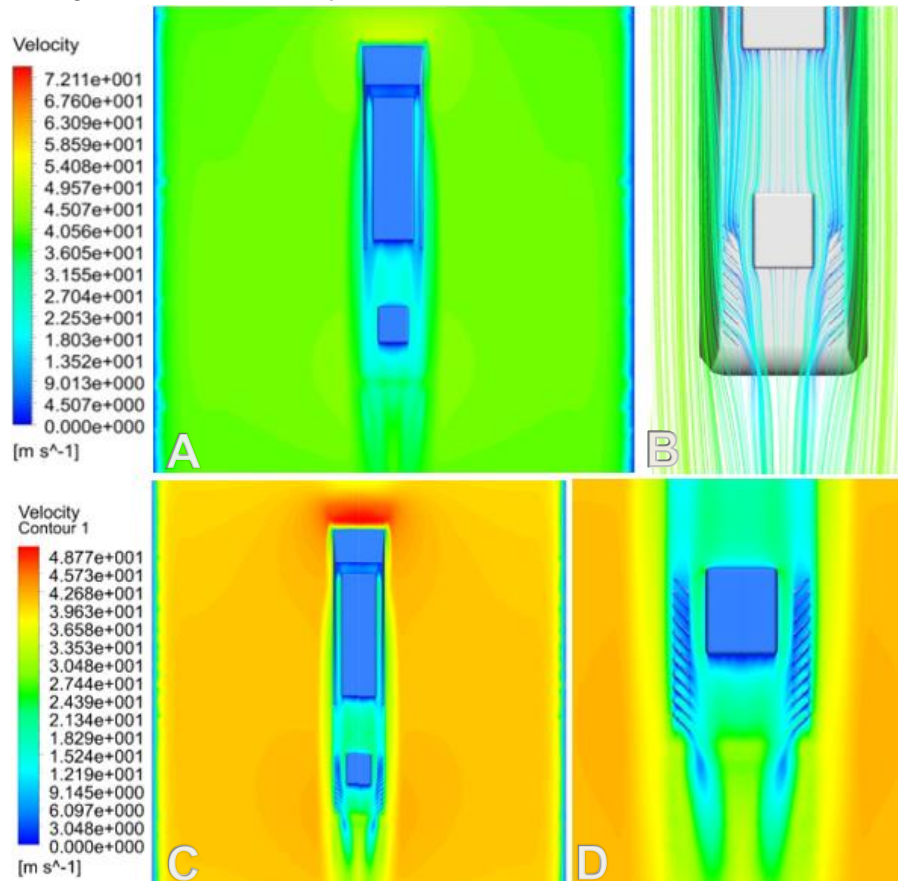


Fuente. Autores

La Figura 55 muestra una vista superior de la velocidad con detalle en la sección posterior del bus, esta permite la visualización más clara de la orientación del flujo hacia el centro del modelo y el gradiente ascendente de velocidad sobre el dispositivo. Se presenta una característica singular de corriente de baja velocidad que proviene del último tabique...Figura 55 D..., con la ayuda de la Figura 56 A., dicha singularidad se identificó como un vórtice el cual al compararse con los

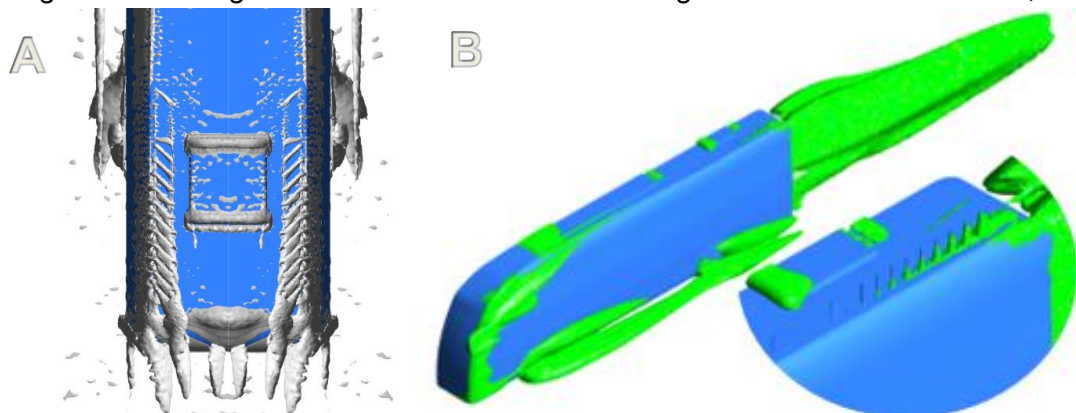
resultados sin el dispositivo confirma que logró ser proyectado hacia el centro de la estela, cabe resaltar que estas características del flujo también se asocian a un alto valor de energía cinética turbulenta como se observa en la Figura 56 B.

Figura 55. Contornos y streamline de velocidad sobre el modelo



Fuente. Autores

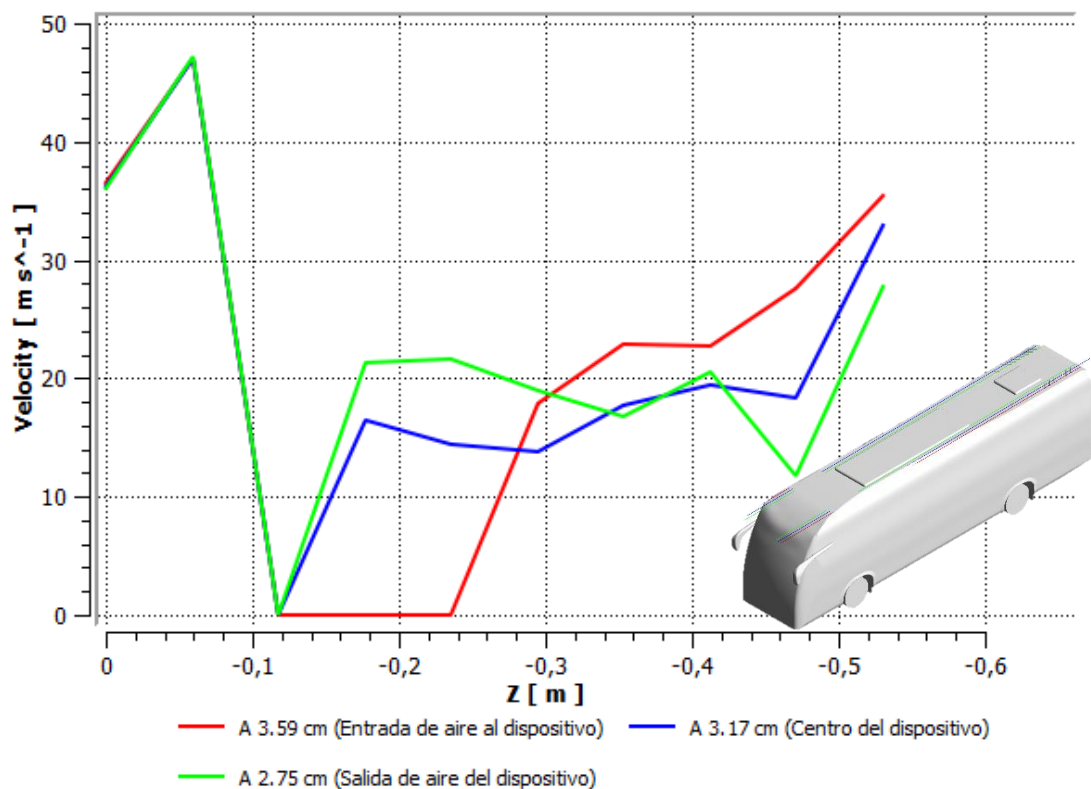
Figura 56. A. Región de núcleo de vórtices B. Energía cinética turbulenta a 28,65 J/Kg



Fuente. Autores

La Gráfica 27., muestra la velocidad del flujo sobre líneas en el centro y los bordes del dispositivo 3 ubicado entre 0,42m y 0,5m, en esta zona se aprecia que la velocidad de la línea verde, la más próxima al plano de simetría, permanece con menor magnitud que las líneas roja y azul, correspondientes al extremo y centro de los Carriles respectivamente. A lo largo del dispositivo 3 la velocidad del flujo aumenta en la entrada de aire, el comportamiento de las líneas al interior y a la salida del dispositivo enseñan caída en la velocidad desde el inicio de los Carriles hasta 0,47m, donde esta asciende mostrando que hay un mayor valor en los últimos dos tabiques.

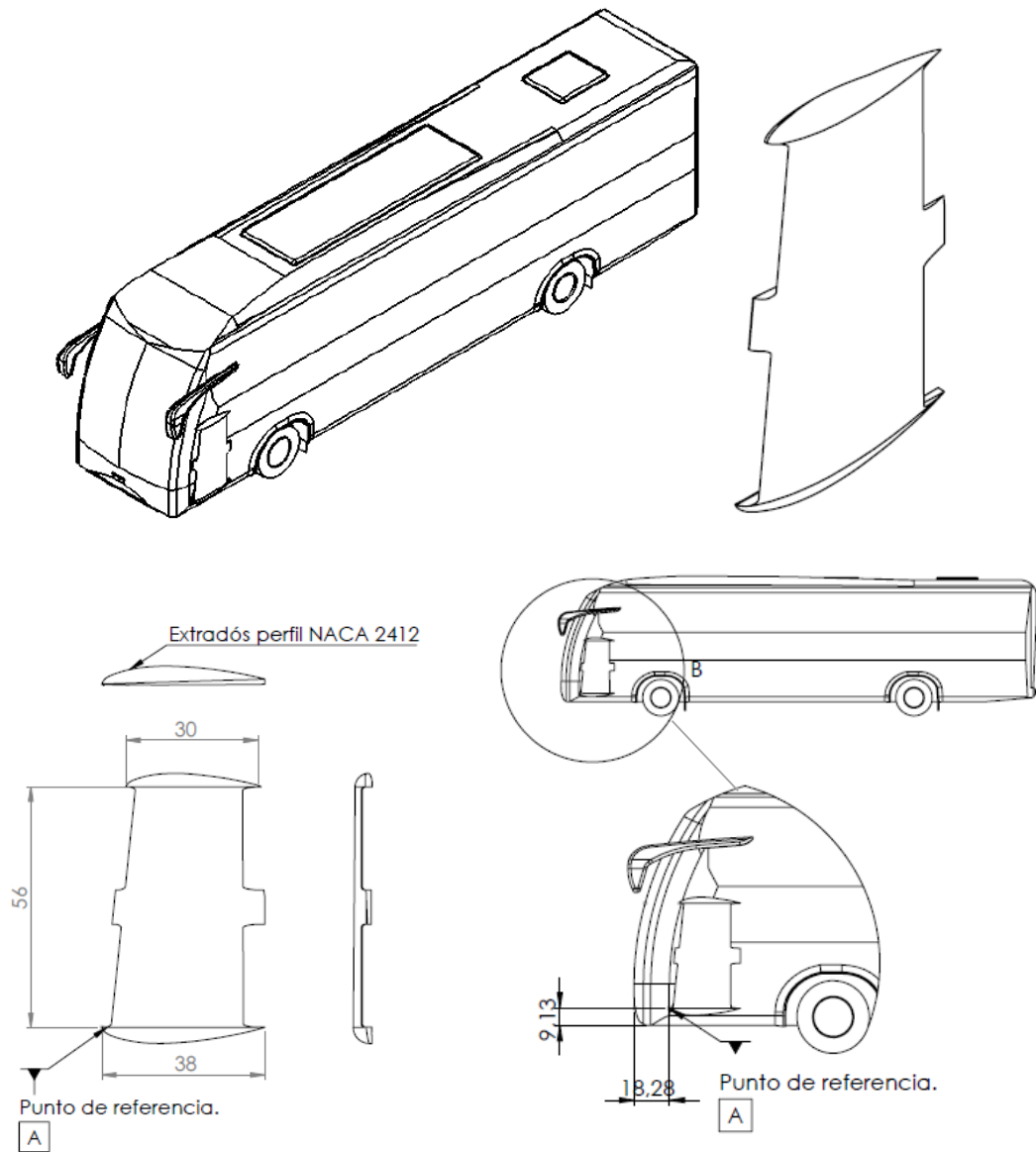
Gráfica 28. Velocidad sobre el Dispositivo 3



Fuente. Autores

7.3.4 Laterales - Dispositivo 4. Los Laterales se diseñaron a partir del extradós del perfil aerodinámico NACA 2412 en su exterior, mientras la superficie coincidente con el modelo forma dos canales. El propósito del dispositivo es orientar y adherir el flujo a la superficie lateral del modelo, procurando retrasar el desprendimiento de la capa límite, ya que, en las pruebas de visualización del bus sin dispositivo se identificó que en esta zona existe separación y recirculación de aire.

Figura 57. Disposición y dimensiones del dispositivo Laterales en el modelo



Fuente. Autores

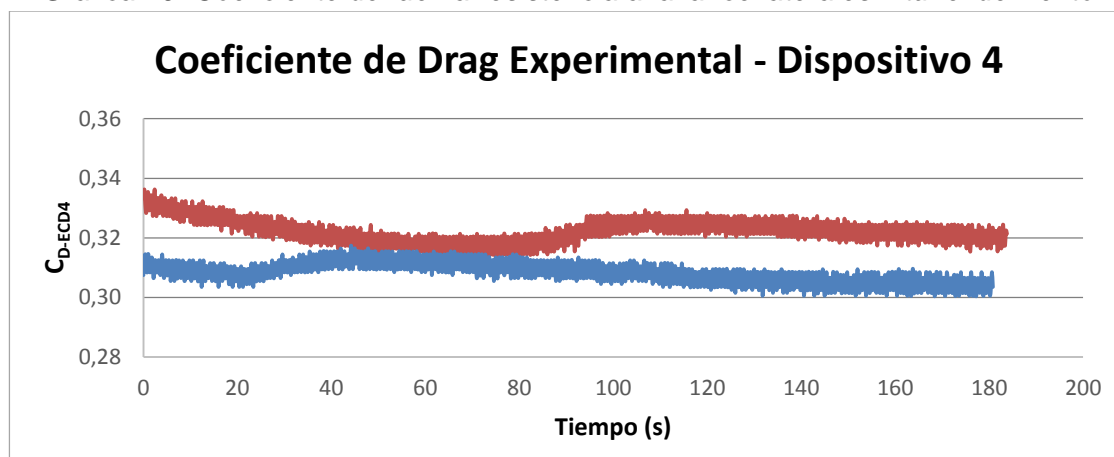
Se realizaron dos pruebas experimentales de medición de fuerza en el túnel de viento, cada una de ellas tuvo una duración de aproximadamente tres minutos después de la estabilización de la velocidad del flujo obteniendo alrededor de 900 datos. Laterales presentó un Coeficiente de Drag experimental (C_{D-ECD4}) de 0,3153 incluyendo la corrección por el Blockage ratio, el cual representa una reducción de 20,37% con respecto al C_{D-Bus} , siendo el dispositivo que más redujo la resistencia aerodinámica.

Tabla 18. Resultados datos experimentales

Datos Experimentales					Corrección Blockage		
Prueba N°	Fuerza Prom (N)	C_{D-ECD4} Max	C_{D-ECD4} min	C_{D-ECD4} Prom	C_{D-ECD4} Max	C_{D-ECD4} min	C_{D-ECD4} Prom
1	3,2492	0,3467	0,3222	0,3323	0,3362	0,3124	0,3223
2	3,1087	0,3273	0,3099	0,3179	0,3174	0,3005	0,3083
Promedio	3,1790	0,3370	0,3160	0,3251	0,3268	0,3065	0,3153

Fuente. Autores

Gráfica 29. Coeficiente de fuerza resistencia al avance laterales 2 túnel de viento



Fuente. Autores

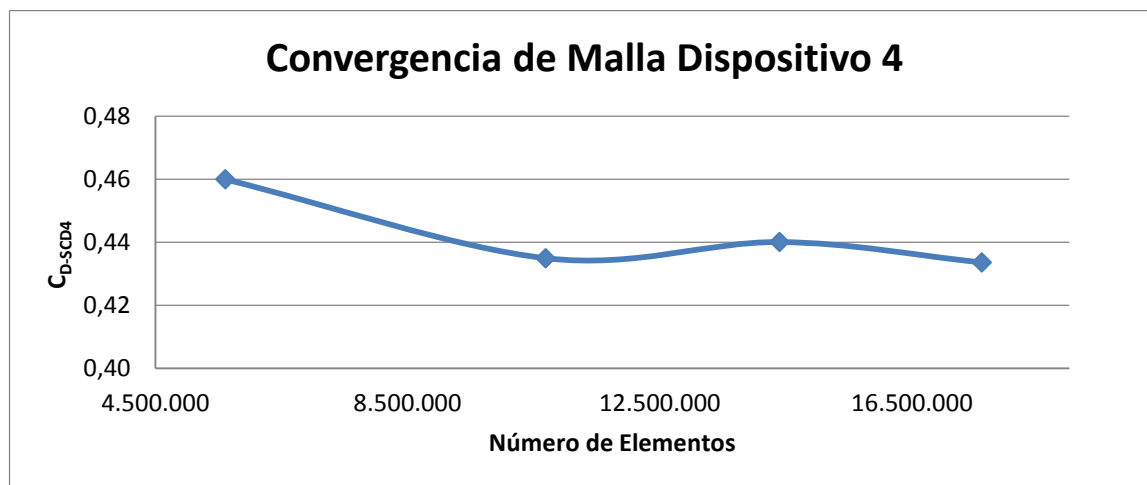
Para el dispositivo 4 se llevaron a cabo cuatro simulaciones computacionales con el fin de lograr el análisis de independencia de malla como se puede evidenciar en la Gráfica 30., obteniendo como malla optima la que se compone de 10.688.546 elementos con un C_{D-SCD4} de 0,4339. Esta malla cuenta con 15 capas y un $Y+$ promedio de 3,9074, todas las gráficas e histogramas adicionales correspondientes a los resultados de esta simulación se podrán encontrar en el Anexo D.

Tabla 19. Diferencia del CD de las simulaciones del Dispositivo 4

Número de Elementos	C_{P-SCD4}	C_{V-SCD4}	C_{D-SCD4}	Error (%) C_{D-ECD4}	Error (%) C_{D-STSD}	Error Porcentual entre Mallas (%)	
5.607.345	0,3503	0,1134	0,4638	47,10	12,27	1,16	6,63
10.688.546	0,3245	0,1104	0,4349	37,96	5,30		
14.398.536	0,3250	0,1150	0,4400	39,58	6,53		1,49
17.209.396	0,3235	0,1101	0,4336	37,53	4,97		

Fuente. Autores

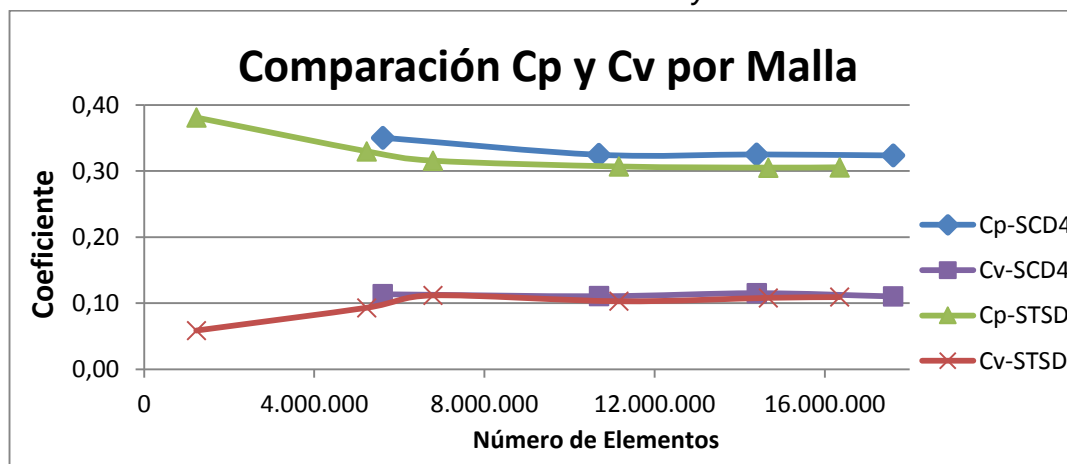
Gráfica 30. Coeficiente de fuerza resistencia al avance laterales 2 túnel de viento



Fuente. Autores

En la Gráfica 31., se puede observar que en el coeficiente de fuerzas viscosas de la simulación con el dispositivo 4 no hubo una alteración relevante respecto a la simulación sin dispositivo, identificando junto con las anteriores simulaciones que la alteración del Drag para este modelo es debida principalmente a las fuerzas de presión.

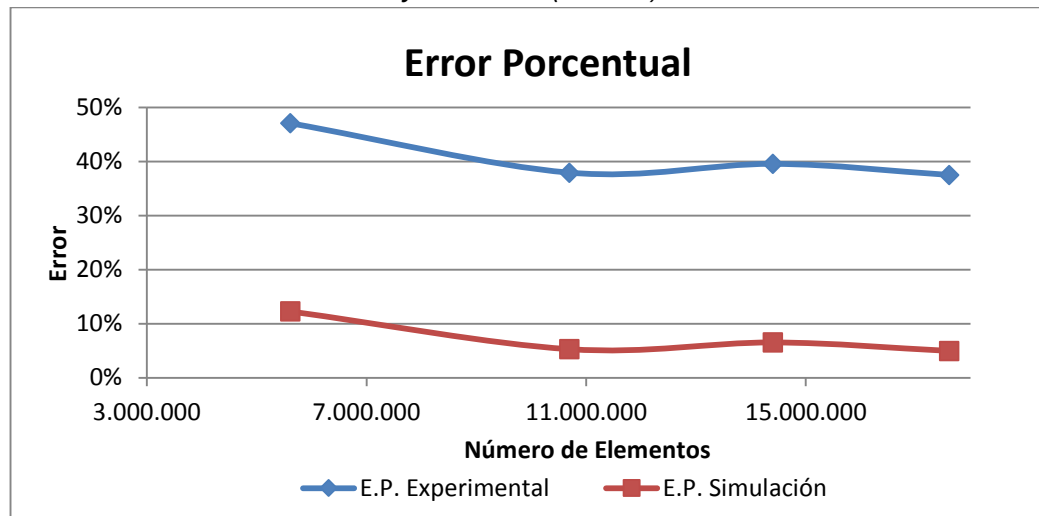
Gráfica 31. Comparación de los coeficientes C_{p-SCD4} , C_{v-SCD4} , respecto al número de elementos de las mallas simuladas y la Gráfica 9



Fuente. Autores

Al realizar la comparación porcentual entre los datos de la experimentación y los obtenidos en la simulación con el dispositivo 4, se encontró que estos tienen el mayor error llegando a 37,96% en la malla óptima. ...Gráfica 32....

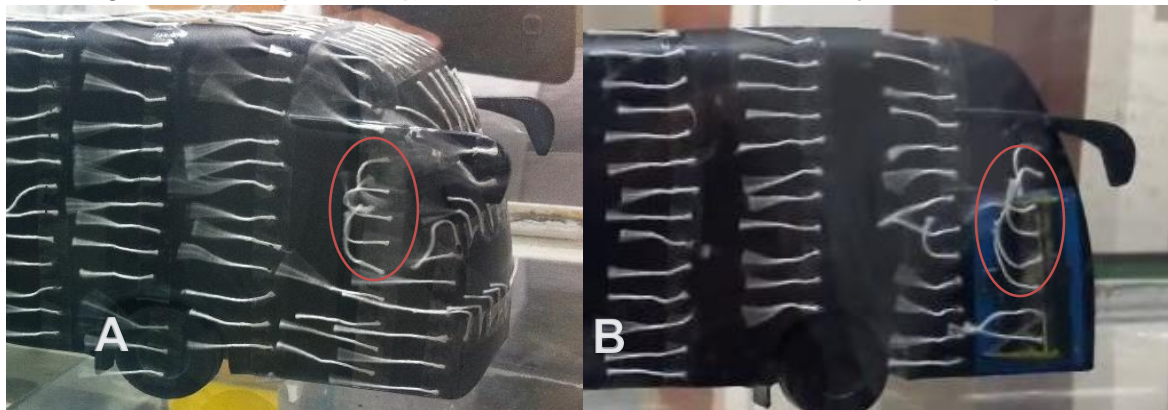
Gráfica 32. Error porcentual entre los datos de Coeficiente de Drag experimental (C_{D-ECD4}) y simulado (C_{D-SCD4})



Fuente. Autores

Las pruebas experimentales de visualización en el túnel de viento realizadas con tufts revelaron que la primera línea de hilos presenta un comportamiento similar a sus iguales sin el dispositivo incorporado,...Figura 58. A, B... manteniendo la turbulencia propiciada por el espejo retrovisor, el aire que entra por los orificios hace que el comportamiento del flujo sobre la superficie lateral del bus sea mucho más uniforme sin embargo se observa una estela turbulenta detrás del canal superior del dispositivo...Figura 59. B....

Figura 58. Comparación pruebas de visualización hilos con y sin el dispositivo



Fuente. Autores

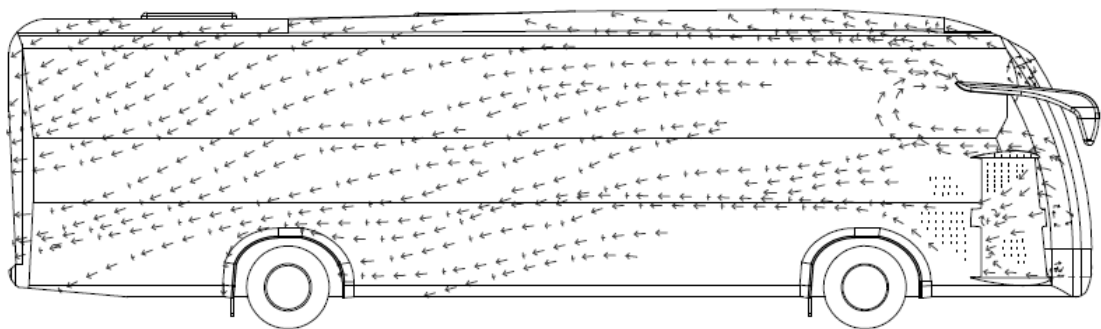
Figura 59. Comparación pruebas de visualización dióxido titanio con y sin el dispositivo



Fuente. Autores

Gracias a los datos recolectados con las dos pruebas de visualización se esbozaron las líneas de flujo sobre la superficie del modelo con el dispositivo incorporado. En la Figura 60., se observa la interpretación del comportamiento de la superficie con la incorporación del dispositivo 4, los puntos simbolizan aquellos lugares en los que se generan estancamientos del aire.

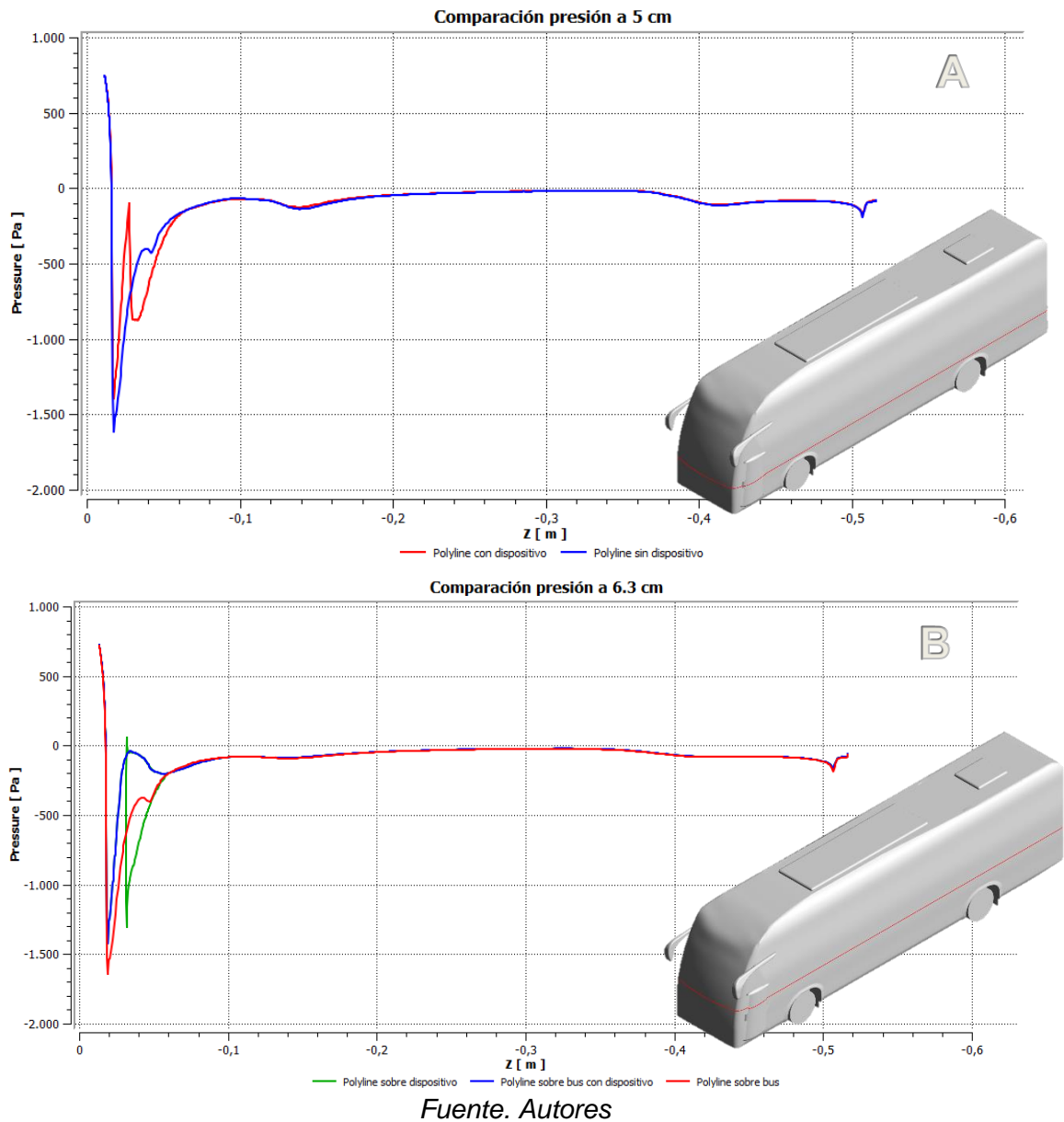
Figura 60. Líneas de flujo sobre la superficie del bus



Fuente. Autores

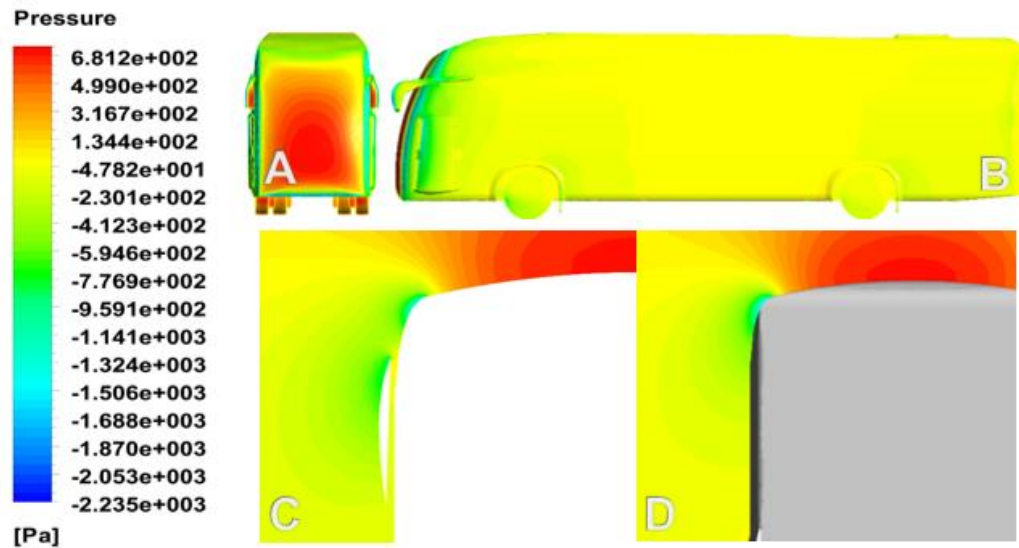
En la Figura 61. B., se observa que la presión tiene un leve aumento justo antes de la entrada de los Laterales con respecto al bus sin dispositivo, este cambio de presión genera una pequeña zona de baja velocidad... Figura 63. C... en la cual se acumula el flujo como se observa en la Figura 59. B.

Gráfica 33. Presión sobre el modelo usando polylines con Dispositivo 4



La Gráfica 33. A., es una comparación de la presión sobre el bus con y sin dispositivo en una polyline a 5 cm del suelo, donde se observa un pico con magnitud aproximada de -100Pa y a partir del cual hay una disminución de la presión hasta -900Pa, posteriormente asciende hasta tener el mismo comportamiento de la línea azul cerca de los 6cm en el eje Z. La presión dentro de los canales es mayor a la encontrada sobre la superficie... Figura 61. C... como se evidencia en la Gráfica 33. B., donde se muestran los cambios de presión sobre, dentro de los canales y en la superficie del bus a una altura de 6.3cm del suelo.

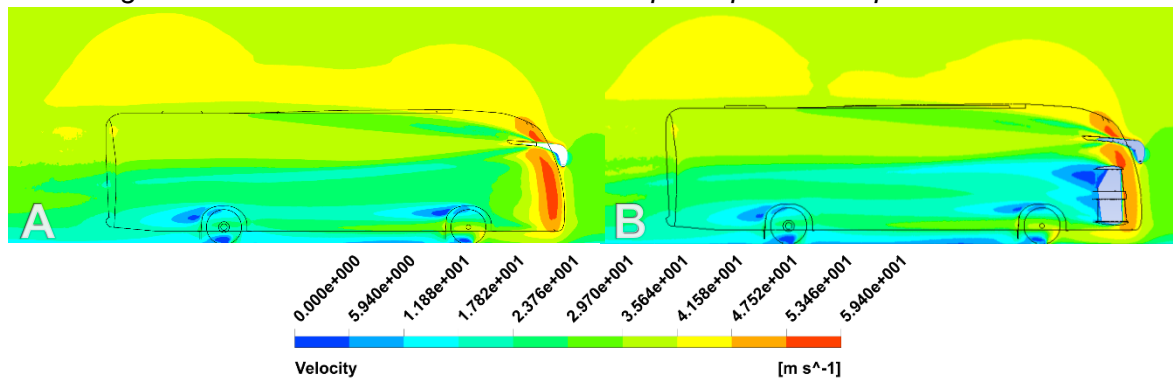
Figura 61. Contornos de presión zona del dispositivo



Fuente. Autores

Los contornos de velocidad generados en un plano paralelo al plano de simetría que corta los orificios del dispositivo...Figura 62... enseñan que existe una caída de velocidad detrás del dispositivo y a lo largo del bus afectando el comportamiento de la estela, esto valida lo observado en las pruebas con aceite y dióxido de titanio...Figura 59. B... donde se visualiza líneas de flujo más ordenadas.

Figura 62. Contorno de velocidades sobre plano paralelo al plano de simetría

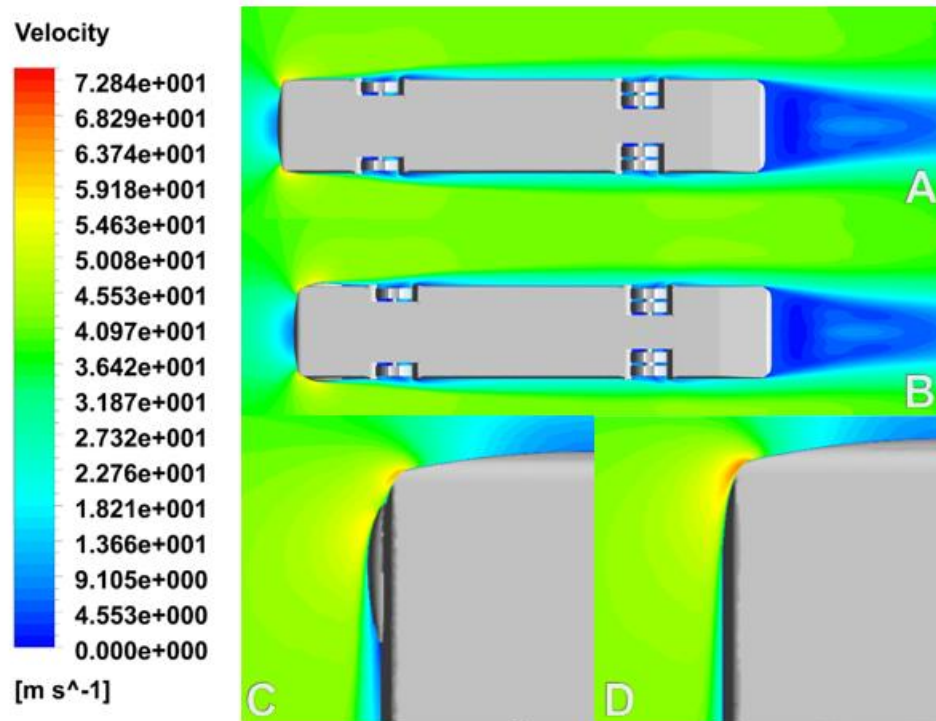


Fuente. Autores

En la Figura 63., se presentan contornos de velocidad en un plano paralelo al suelo, allí se identifica que el dispositivo genera una pequeña estela a partir de su punto más alejado del bus, sin alterar considerablemente la estela que se desarrolla desde las llantas hasta el final del modelo. En la Gráfica 34., se observa la velocidad en líneas cercanas a la pared del modelo, identificando que aproximadamente a los 5cm se encuentran ubicados los picos de mayor valor, además, a lo largo de la del

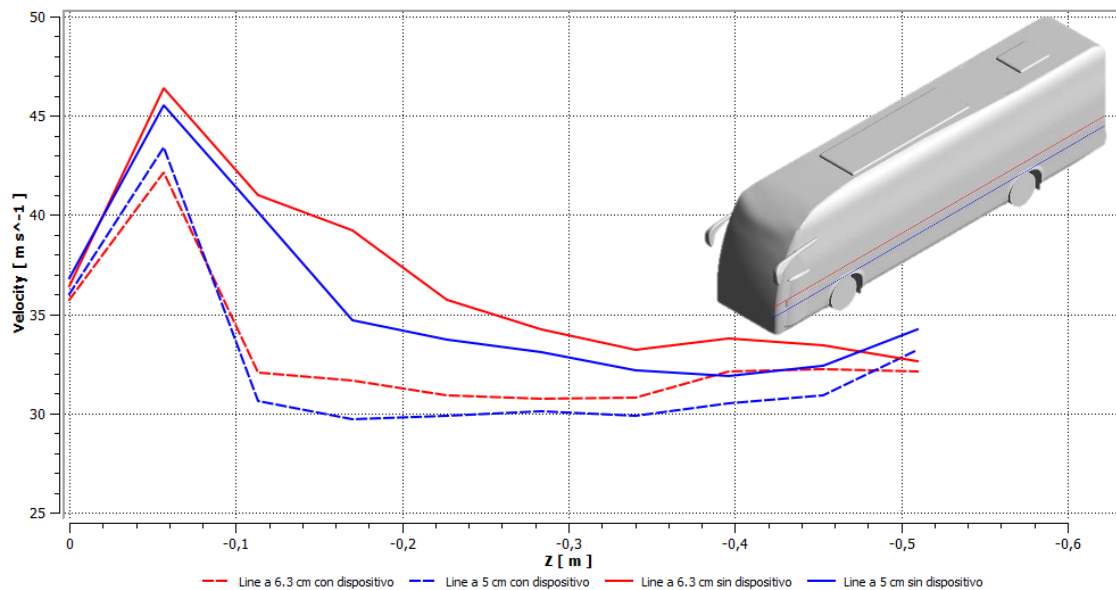
eje longitudinal, la velocidad del flujo en las proximidades del bus con Laterales es menor con respecto al modelo sin el dispositivo.

Figura 63. Contornos de velocidad paralelos al suelo



Fuente. Autores

Gráfica 34. Velocidad sobre el Dispositivo 4

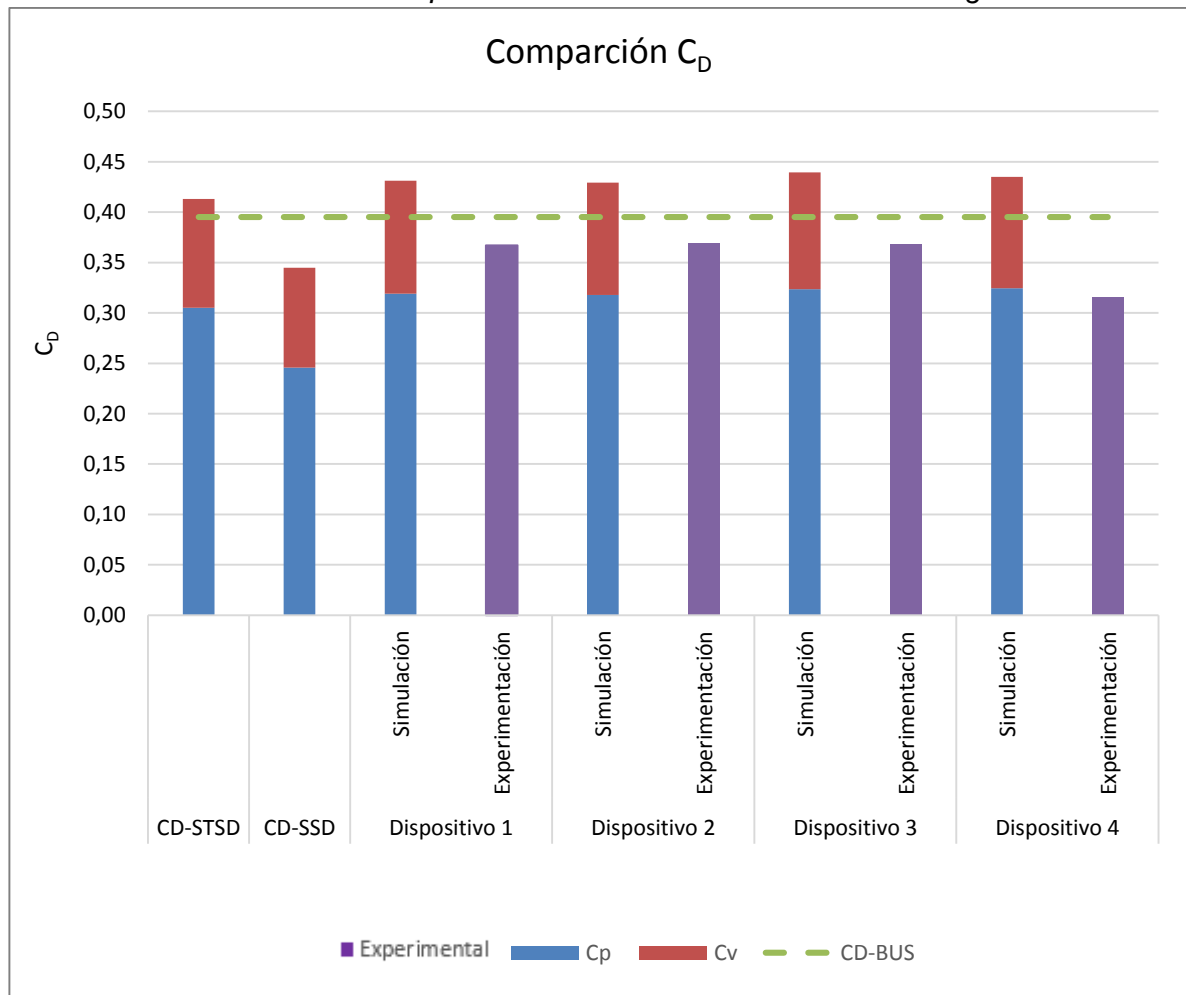


Fuente. Autores

7.4 COMPILACIÓN RESULTADOS DE COEFICIENTES DE DRAG

La Gráfica 35., presenta los resultados de las pruebas experimentales y de simulación obtenidos para todas las configuraciones del bus. La línea verde a trazos representa el Coeficiente de Drag experimental siendo el valor que se busca reducir y el punto de referencia para la validación de las simulaciones sin dispositivo. Las barras purpura enseñan el Coeficiente de Drag experimental con la implementación de los diferentes dispositivos, las barras azules hacen referencia al coeficiente de Drag por presión, las barras de color rojo significan el coeficiente de Drag por viscosidad, la suma de las dos últimas exponen el Coeficiente de Drag para las simulaciones.

Gráfica 35. Compilación de resultados Coeficiente de Drag



Fuente. Autores

8. CONCLUSIONES

Para el modelo Marcopolo 1200 de séptima generación, se logró identificar experimentalmente que a través de alteraciones superficiales en ciertas regiones del vehículo con alto impacto aerodinámico, es posible reducir la resistencia al avance.

Los diferentes métodos de visualización del flujo de aire en la superficie del bus permitieron hallar zonas de turbulencia, vorticidad y recirculación en la joroba, en la parte delantera y trasera del aire acondicionado y la claraboya, en las superficies laterales bajo los espejos, detrás de ellos, en las llantas y en la región trasera de los boceles.

Para los dispositivos llevados a pruebas de fuerza en túnel de viento subsónico de baja velocidad, se encontró que los Laterales re direccionan el flujo a través de sus canales en la zona lateral del modelo, reduciendo la resistencia aerodinámica en un 20,37 % con respecto a los datos obtenidos del bus sin ningún tipo de alteración, siendo así el dispositivo más eficiente.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones del bus sin dispositivo, se determinó que existe una variación del Coeficiente de Drag para los dos tipos de dominio, debido a la presencia de paredes que representan la sección de prueba en uno de ellos. Con el dominio de área transversal del túnel de viento se llegó a valores cercanos a los obtenidos durante la experimentación, mientras que con el dominio recomendado por la literatura los valores son aproximadamente 16% menores.

Al realizar la comparación de los resultados del modelo con dispositivos, se encontró que experimentalmente el coeficiente de Drag se reduce en los cuatro casos expuestos con respecto al bus sin alteración en la superficie, por el contrario, las simulaciones demuestran un aumento del coeficiente de la resistencia aerodinámica, esto puede deberse a que modelo de turbulencia empleado no resuelve la subcapa viscosa y/o a la baja calidad de la malla por la presencia elementos piramidales.

A partir del análisis del comportamiento de los coeficientes de fuerzas viscosas y de forma, se comprobó que el generado por presión afecta en mayor medida este tipo de vehículos sin verse un cambio significativo en el coeficiente de fuerzas viscosas

al implementar los dispositivos, este comportamiento también puede deberse al modelo de turbulencia.

Se evidencio la dificultad en la convergencia del proceso de simulación con el dominio de sección transversal del túnel de viento siendo mucho menor al recomendado por la literatura, por lo que fue necesario hacer un cambio progresivo en la complejidad del algoritmo de acoplamiento Presión-Velocidad y en la discretización espacial.

Respecto a los cálculos de espesor de la capa límite para las paredes de la sección de prueba del túnel de viento se concluye que ésta no afecta considerablemente la resistencia aerodinámica del bus debido a que la altura de la carrocería es mayor y su interacción con las llantas es mínima.

Debido a las características del túnel de viento, a las condiciones en las que se llevó a cabo la experimentación y por cálculos de similaridad, el Coeficiente de Drag del modelo puede variar a escala real... Anexo C....

A pesar de los prometedores resultados experimentales no fue posible validar computacionalmente la reducción del Coeficiente de Drag al implementar los dispositivos.

9. RECOMENDACIONES

En este trabajo se presentan resultados de Coeficientes de Drag a un ángulo de guiñada de 0° por lo que se recomienda realizar estudios variando este ángulo, para determinar el cambio del coeficiente al utilizar los dispositivos.

Es recomendable utilizar un sistema de medición certificado y calibrado durante la experimentación que brinde confiabilidad de los datos obtenidos.

Para tener en cuenta el efecto de rotación de las llantas en el comportamiento del flujo, se recomienda utilizar un método de simulación del suelo como los mencionados por Barlow.

Con el fin de aumentar la precisión de los datos es trascendental tener en cuenta detalles de importancia del modelo que puedan afectar su aerodinámica, como lo son entradas de aire entre otros.

Al realizar visualización con tufts se recomienda localizar zonas de interés, retirar líneas de hilos a su alrededor y realizar la prueba nuevamente con el fin de observar el fenómeno de una forma adecuada.

Profundizar en las zonas de recirculación ya que representa una región importante para alterar el Drag del vehículo como se observó en este trabajo, corroborando lo hallado por Carregari.

Se recomienda realizar simulaciones con el modelo SST $k-\omega$ que une el modelo $k-\epsilon$ y $k-\omega$ para hacer un análisis más cercano a las paredes, manteniendo el enfoque en la energía cinética turbulenta utilizado en esta investigación. Para identificar los puntos de separación de la capa límite por medio de CFD, se recomienda utilizar un modelo diferente al RANS.

Es una buena práctica identificar el Y^+ óptimo al realizar mallas de este tipo de vehículos, con el fin de disminuir consumo computacional y tiempo de simulación.

Realizar validación de los resultados utilizando un método experimental que emplee un bus real y verificar si reduce el consumo de combustible, además, efectuar la simulación CFD con dimensiones reales del Marcopolo 1200 G7.

10. BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, Jhon. 2001.** *Fundamentals of Aerodynamics*. Nueva York : McGraw-Hill, 2001. ISBN 0-07-237335-0.
- ANSYS, Inc.** *Lecture 3: Cell Zone and Boundary Conditions [Diapositivas]*. ANSYS, Inc: 2015.
- . **2015.** *Lecture 7: Turbulence Modeling. [Diapositivas]*. s.l. : ANSYS, Inc, 2015.
- BARLOW, Jewel y RAE, William y POPE, Alan. 1999.** *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. Toronto : JOHN WILEY & SONS, INC, 1999. p. 25, 188-216, 579-606.
- BLANCO, David y LÓPEZ, Omar y MÚÑOZ, Luis.** En: **IMM 2015 VII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Abril de 2015.** *Predicción del comportamiento aerodinámico de un vehículo comercial bajo un ciclo estándar de conducción urbano por medio de dinámica de fluidos computacional*. Cartagena : s.n., En: *IMM 2015 VII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Abril de 2015*.
- CARREGARI, André Luiz. Tesis de Maestría.** *Estudo do Escoamento de Ar sobre a Carroceria de um Ônibus usando um Programa de CFD e Comparação com Dados Experimentais*. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. : São Paulo, Tesis de Maestría. 2006. p. 10-12.
- CARRIÓN, Sergio y CABRERA, Oscar y RAMOS, Diego.** *ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE UN BUS INTERMUNICIPAL PARA MEJORAR SU RENDIMIENTO AERODINÁMICO*. En: *CIMM 2015. VII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Abril de 2015* : s.n.
- CHONGHAI, Huang y DONGJIE, Liu a y JINJIA, Wei.** *Experimental study on drag reduction performance of surfactant flow*. En: *Chemical Engineering Science*, Junio de 2016 : no. 152. p. 267-279.
- HUCHO, Heinrich. 1987.** *Aerodynamics of road vehicles*. Londres : Butterworth-Heinemann, 1987. p. 30-32.
- . **2013.** *Aerodynamik des Automobils*. Munich : Springer Vieweg, 2013. p. 660.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. 2008.** *Documentación. Presentación de Tesis, Trabajos de grado y otros trabajos de investigación (NTC 1486)*. Bogotá D.C : s.n., 2008.
- . **2008.** *Referencias Bibliográficas. Contenido, Forma y Estructura (NTC 5613)*. Bogotá D.C : s.n., 2008.
- KATZ, Joseph. 2016.** *Automotive Aerodynamics*. San Diego : Thomas Kurfess, 2016. p. 5.

- KOIKE, Masaru y NAGAYOSHI, Tsunehisa y HAMAMOTO, Naoki.** *Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators. Technical Review Mitsubishi Motors.* 2004. Vol. 16.
- LANAS, David.** *Análisis y optimización de la aerodinámica de la carrocería de un autobús por medio de la utilización de un programa de diseño por análisis de elementos finitos (Engineering Fluid Dynamics) . Escuela Politecnica del Ejército (ESPE) : Latacunga, Tesis de Grado.* 2007 : s.n.
- LANFRIT, Marco. 2005.** *Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT.* Darmstadt : Fluent Deutschland GmbH, 2005.
- LEWIS, O. 2006.** *Aerodynamic analysis of a 2-man bobsleigh.* Holanda : Delft University of Technology, 2006.
- LI, W et al.** *Turbulent drag reduction by spanwise traveling ribbed surface waves.* En: *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Abril de 2015 : no 53. p. 101-112.
- MUTHUVEL, A et al.** En: **International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Julio de 2013.** *Aerodynamic Exterior Body Design of Bus.* India : s.n., En: *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Julio de 2013. ISBN 2229-5518. p. 2453-2457.
- OSTH, Jan et al.** En: **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.** Julio de 2016. *Cluster-based reduced-order modelling of the flow in the wake of a high speed train.* s.l. : ELSEVIER: no 145, En: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* Julio de 2016. p. 327-338.
- SACHIN, Thorat y GAMBHA Prasad Rao. 2011.** *Computational analysis of Intercity bus with improved aesthetics and aerodynamic performance on indian roads.* *International Journal of Advanced Engineering Technology* : Vol II, p. 103-109, 2011.
- TAEKYUNG, Kim y al., et.** En: **Applied Surface Science.** Enero de 2016. *Drag reduction using metallic engineered surfaces with highly ordered hierarchical topographies: nanostructures on micro-riblets.* Seoul : no. 367, En: *Applied Surface Science.* Enero de 2016. p. 147-152.
- VERSTEEG, H K y MALALASAKERA, W. 1995.** *An introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method.* New York : Longman scientific & technical, 1995. p. 2-72.
- WANG, Hanfeng et al.** *Aerodynamic drag reduction of an Ahmed body based on deflectors.* En: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Diciembre de 2015 : no 148. p. 34-44.
- WOLFGANG, Merzkirch. 1987.** *Flow Visualization.* Alemania : Academic press. INC, 1987. p. 115- 218.
- YEPES, Tito, et al. 2013.** *Infraestructura de Transporte en Colombia.* Colombia : Fedesarrollo, 2013. p. 86.

ANEXO A

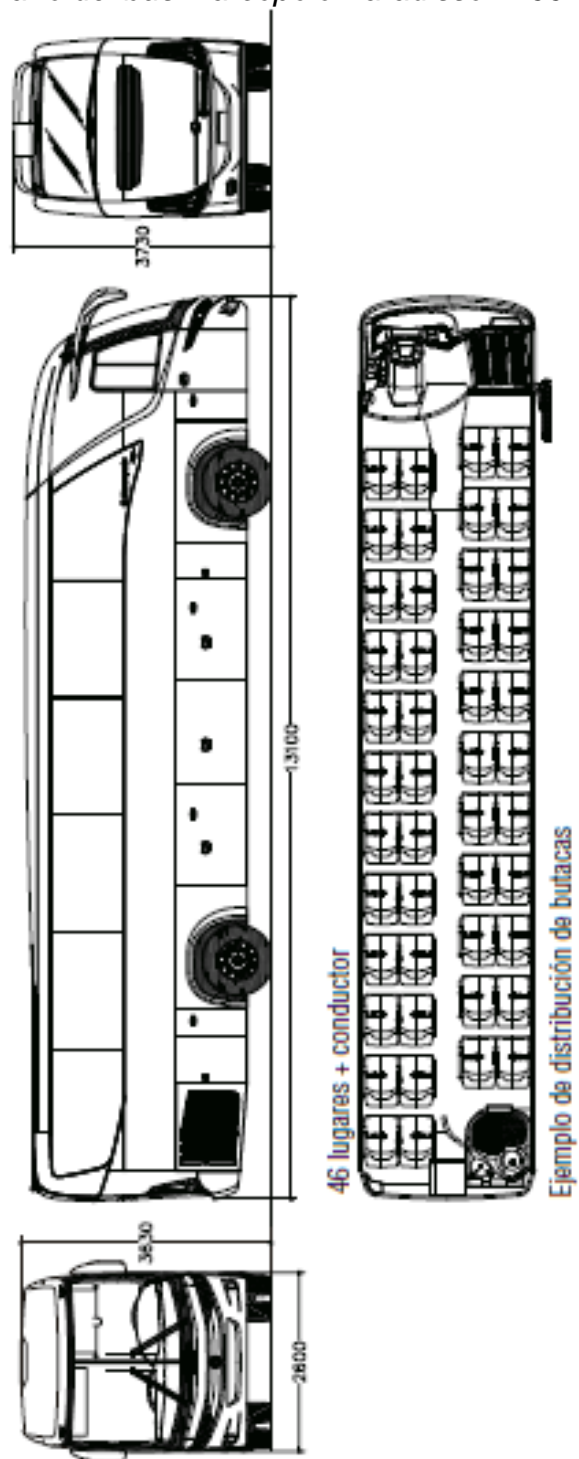
Modelos de buses presentes en compañías de transporte intermunicipal colombianas

Empresa	Bus	
	Marca de Carrocería	Modelo de Referencia
<i>Bolivariano</i>	<i>Marcopolo</i>	<i>Paradiso 1800 DD G7</i>
		<i>Paradiso 1200 G6</i>
		<i>Paradiso 1200 G7</i>
		<i>Andare Class</i>
	<i>Scania</i>	<i>No encontrada</i>
	<i>Busscar</i>	<i>Busstar 360</i>
<i>Copetran</i>	<i>Marcopolo</i>	<i>Andare Class</i>
	<i>Busscar</i>	<i>Busstar DD</i>
<i>Omega</i>	<i>Marcopolo</i>	<i>Paradiso 1200 G6</i>
		<i>Paradiso 1200 G7</i>
	<i>AGA</i>	<i>No encontrada</i>
<i>Expreso Palmira</i>	<i>Busscar</i>	<i>Busstar DD</i>
<i>Velotax</i>	<i>Scania</i>	<i>Duo</i>
<i>Rapido Tolima</i>	<i>Marcopolo</i>	<i>Paradiso 1200 G7</i>
	<i>Scania</i>	<i>Duo</i>
<i>Flota Magdalena</i>	<i>Marcopolo</i>	<i>Paradiso 1200 G7</i>
	<i>Scania</i>	<i>Duo</i>
	<i>Busscar</i>	<i>Busstar DD</i>
	<i>Hino</i>	<i>No encontrada</i>
<i>Cootranshuila</i>	<i>Marcopolo</i>	<i>Andare Class</i>
		<i>Paradiso 1200 G6</i>
		<i>Paradiso 1200 G7</i>
	<i>Scania</i>	<i>Duo</i>
<i>Libertadores</i>	<i>Marcopolo</i>	<i>Paradiso 1200 G6</i>
		<i>Paradiso 1800 DD G7</i>
<i>Comotor</i>	<i>Scania</i>	<i>Duo</i>
	<i>Marcopolo</i>	<i>Paradiso 1200 G6</i>
	<i>Chevrolet</i>	<i>No encontrada</i>

Fuente. Autores

ANEXO B

Plano del bus Marcopolo Paradisso 1200 G7



Fuente. Marcopolo, Brochure paradisso 1200. En línea: marcopolo.com.br

ANEXO C Cálculos

Corrección aproximada por *Blockage Ratio*:

$$\varepsilon = \frac{1}{4} \frac{\text{Area Frontal Modelo}}{\text{Area Sección de prueba}}$$

$$\varepsilon = 0,0155$$

$$q_{\infty C} = q_{\infty} (1 + \varepsilon)^2$$

Según Barlow, se debe usar una relación máxima entre áreas de 7,5% a menos que se puedan aceptar errores de varios por ciento.

$$RA = \frac{\text{Area Frontal Modelo}}{\text{Area Sección de prueba}}$$

$$RA = 6.1875\%$$

Dimensiones Modelo

$$\text{Area Frontal del Modelo} = b_m * a_m$$

$$\text{Area Frontal Bus Real} = B_b A_b$$

Donde

$$b_m = \text{alto}_{\text{modelo}}$$

$$a_m = \text{ancho}_{\text{modelo}}$$

$$B_B = \text{alto}_{\text{Bus real}}$$

$$A_B = \text{ancho}_{\text{Bus real}}$$

$$c = \frac{B_B}{A_B}; \quad c = \frac{b_m}{a_m}; \quad c = \frac{\text{Alto}}{\text{Ancho}}$$

$$b = c * a$$

$$\text{Area Frontal del Modelo} = c * a * a$$

$$\text{Area Frontal del Modelo} = ca^2$$

$$a_m = \sqrt{\frac{\text{Area Frontal del Modelo}}{c}}$$

$$a_m = \sqrt{\frac{RA * \text{Area Sección de}}{c}}$$

$$b_m = c * a_m$$

Escalas

$$\text{Escala Alto} = \frac{B_B}{b_m}; \quad \text{Escala Ancho} = \frac{A_m}{a_m}; \quad \text{Escala} = \frac{\text{Escala Alto} + \text{Escala Ancho}}{2}$$

$$\text{Escala} = 25.7938$$

Cálculos de similitud:

Barlow afirma, que para experimentos en túnel de viento, el número de Froude es un parámetro importante de similitud solo si son pruebas dinámicas en que el modelo se mueve tanto como para involucrar fuerzas aerodinámicas. Si el modelo se mantiene estático durante la obtención de datos, los números Reynolds y Mach son parámetros significativos de similitud. Si el modelo experimental tiene el mismo número de Reynolds y Mach aplicado al modelo de escala real, entonces el flujo del modelo y a escala real será dinámicamente similares.

En la práctica, rara vez es posible coincidir ambos números de Reynolds y Mach. La concordancia del numero Mach usualmente solo aplica para aeronaves en regiones de vuelo de altas velocidades ya que los efectos de numero Mach predominan y los efectos debidos al número Reynolds no son tan críticos. En regiones de vuelo de baja velocidad los efectos de numero Reynolds predominan y los efectos físicos por numero Mach no son críticos. Sin embargo para cualquier experimento y evaluación cuidadosa de los efectos de los números Reynolds y Mach se podría hacer para asegurar que los resultados pueden ser aplicados al problema de escala real.

Muchas pruebas en túnel de viento son seriamente sensitivos a efectos de número de Reynolds. Un hecho interesante y útil que se desprende de las relaciones a escala, es que la fuerza sobre un cuerpo para el cual las características de flujo son

una función solamente del número de Reynolds independientemente de la combinación del tamaño y velocidad que se utiliza, si el fluido, su temperatura y la presión de la corriente libre no cambian. Se tiene

$$Re_B = Re_m$$

$$\frac{\rho_B V_B C_B}{\mu_B} = \frac{\rho_m V_m C_m}{\mu_m}$$

$$V_B C_B = V_m C_m$$

$$V_B = V_m \frac{C_m}{C_B}; \quad V_B = \frac{V_m}{Esc}$$

$$V_B = 1.4654 \text{ m/s} = 5.2757 \text{ km/h}$$

Espesor de la capa límite de la sección de pruebas del túnel viento:

$$Re_T = \frac{\rho L v}{\mu}$$

Tomándose como régimen turbulento, el espesor de la capa límite según Anderson se encuentra dado por:

$$C_f = \frac{0.37 L}{Re_T^{0.2}}$$

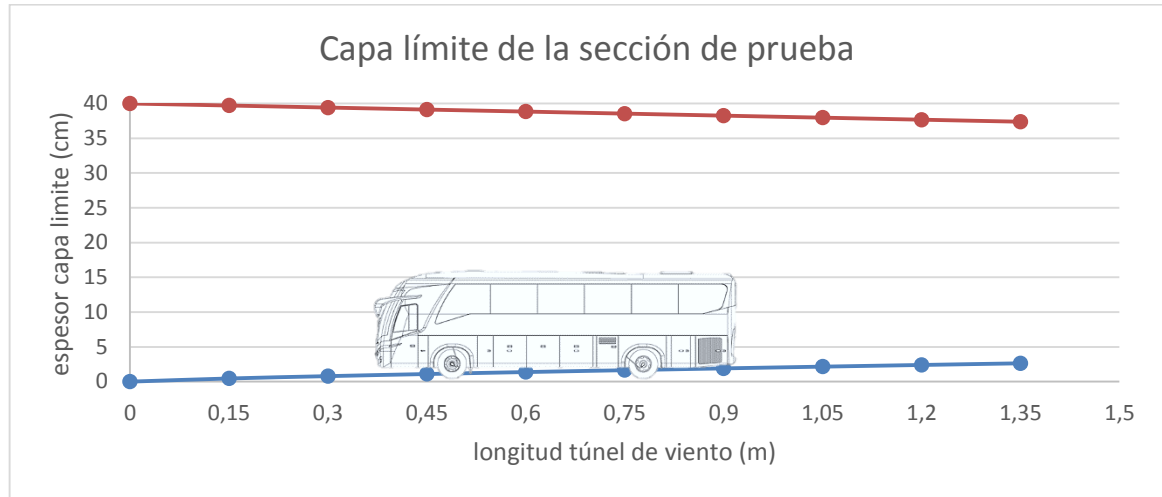
Al realizar el cálculo cada 15 cm en la superficie del suelo se encuentran los siguientes valores:

Número Reynolds y espesor de la capa límite en las paredes de la sección de pruebas

Longitud del túnel (m)	Reynolds (Re_T)	C_f espesor (cm)
0,00001	1,843E+01	0,000
0,15	2,764E+05	0,453
0,3	5,529E+05	0,788
0,45	8,293E+05	1,091
0,6	1,106E+06	1,373
0,75	1,382E+06	1,641
0,9	1,659E+06	1,899
1,05	1,935E+06	2,148
1,2	2,212E+06	2,390
1,35	2,488E+06	2,626
1,39	2,562E+06	2,689

Fuente. Autores

Formación de la capa límite en las paredes de la sección de prueba



Fuente. Autores

Altura de la primera capa de primas Y:

$$Re_b = \frac{\rho L v}{\mu}$$

Tomando como longitud la distancia entre ejes de 0,2007 m el Número Reynolds para el modelo es:

$$Re_b = 369.876,85$$

Tomando como referencia para la fricción de piel:

$$C_f = 0.058 Re_b^{-0.2}$$

$$C_f = 4,4649 * 10^{-3}$$

Los esfuerzos cortantes estarán dados por:

$$\tau_{wall} = \frac{1}{2} C_f \rho U_{\infty}^2$$

$$\tau_{wall} = 2,84 \text{ Pa}$$

La velocidad en la capa límite está dada por:

$$U_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}}$$

$$U_{\tau} = 1,7860 \frac{m}{s}$$

Despejando la ecuación de Y^+

$$Y^+ = \frac{Y U_{\tau} \rho}{\mu} \rightarrow Y = \frac{Y^+ \mu}{U_{\tau} \rho}$$

Resultando que la altura de la primera capa de prismas para las mallas óptimas es de:

Cálculos de Y para las mallas optimas de las simulaciones

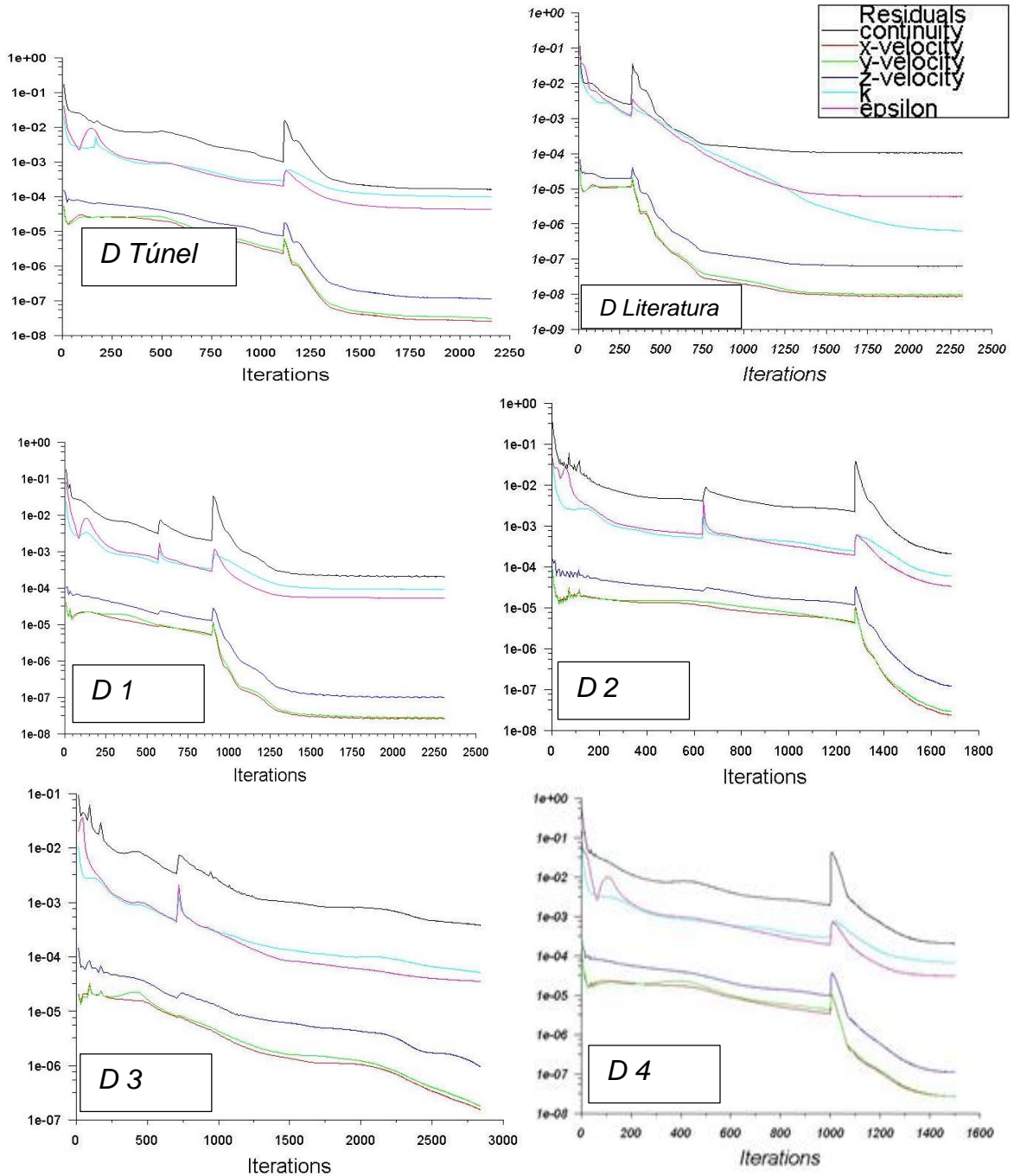
Simulación	Y^+	Y (m)
<i>Dominio Literatura</i>	3,9573	4,4840 E-05
<i>Dominio túnel de viento</i>	3,9761	4,5053 E-05
<i>Dispositivo 1</i>	3,8345	4,3448 E-05
<i>Dispositivo 2</i>	4,2880	4,8587 E-05
<i>Dispositivo 3</i>	4,0972	4,6425 E-05
<i>Dispositivo 4</i>	3,9074	4,4274 E-05

Fuente. Autores

ANEXO D

Información Adicional de Relevancia de las Mallas Utilizadas en las Simulaciones

Gráficas de Convergencia de los residuos para las mallas óptimas



Fuente. Autores

A. Rango de calidad de Ortogonalidad, B. Rango de calidad de Oblicuidad.

A						
	Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
	0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

B						
	Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Fuente. ANSYS, Inc

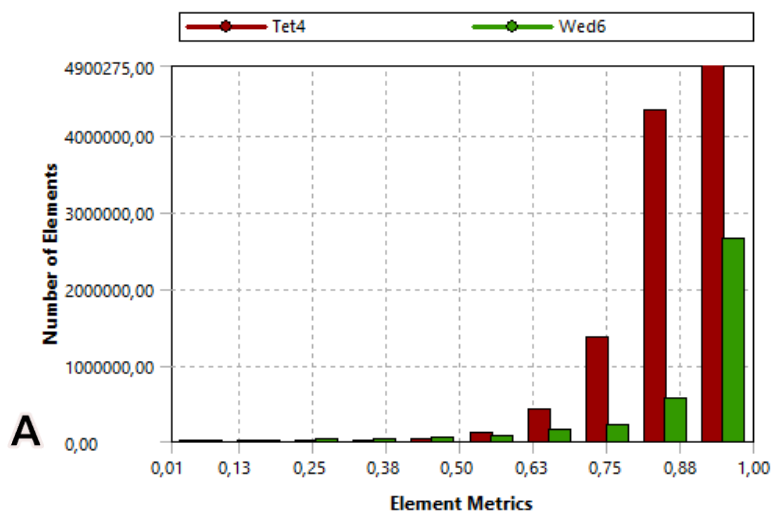
Simulación Dominio Recomendado por la Literatura

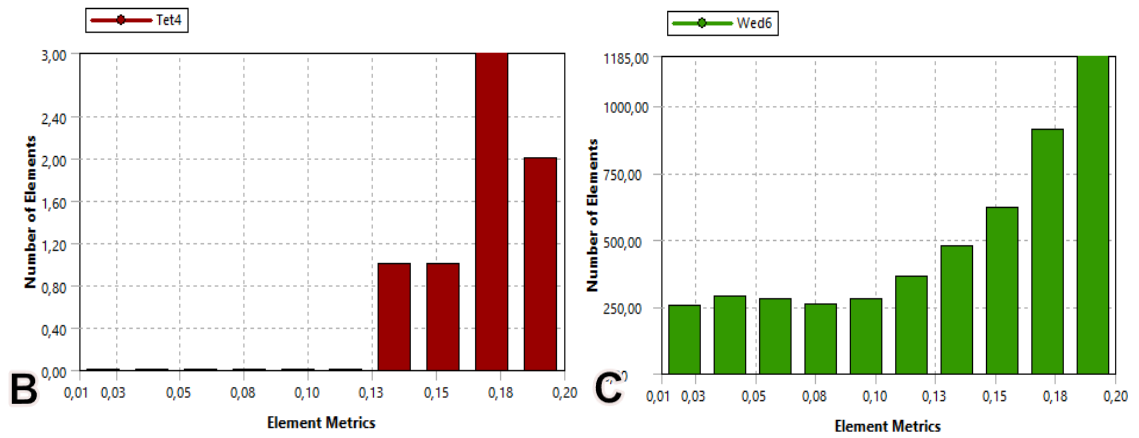
Características de las Mallas.

Calidad de la Malla					Resultados (N)			
Número de Elementos	Número de Nodos	Oblicuidad	Ortogonalidad	Y+	Iteraciones Realizadas	Drag	Fuerza por Presión	Fuerza por viscosidad
		Max	Min	Promedio				
4135291	4135291	0,96168	0,013054	--	1227	3,8939		
6219892	6219892	0,95543	0,0078075	6,9253	2101	3,2954	2,5656	0,7298
6943080	6943080	0,95312	0,0083762	6,8971	1172	3,3818	2,6416	0,7402
7504673	7504673	0,96033	0,0079302	5,9928	849	3,2200	2,5286	0,6914
10351193	10351193	0,92375	0,009238	4,8391	1201	3,2614	2,4308	0,8306
11683761	11683761	0,92375	0,0099464	4,1230	1274	3,5754	2,6416	0,9338
14765546	14765546	0,92364	0,010589	4.0528	2000	3,3730	2,401	0,9720
15472752	15472752	0,96067	0,013333	3,964	2000	3,4130	2,3125	1,1005

Fuente. Autores

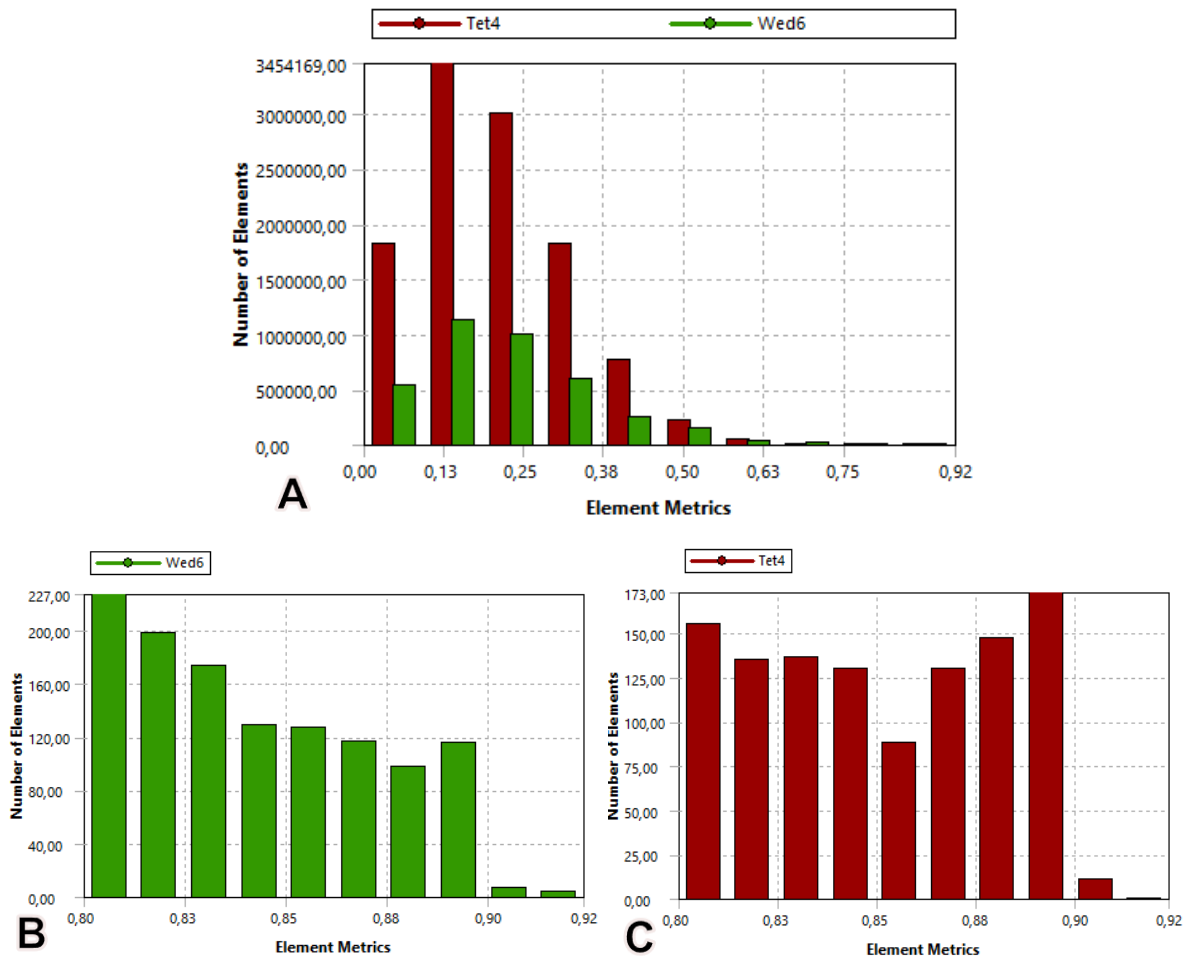
A. Histograma de calidad de Ortogonalidad. Histograma de baja calidad de Ortogonalidad, B. Tetraedros, C. Prismas.





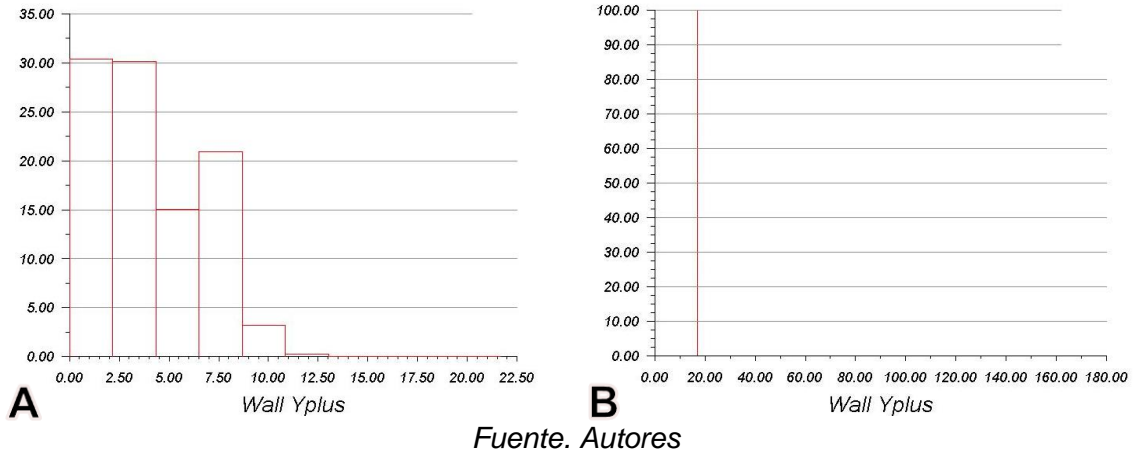
Fuente. Autores

A. Histograma de calidad de Oblicuidad. Histograma de baja calidad de Oblicuidad, B. Tetraedros, C. Prismas.



Fuente. Autores

Histograma Y+, A. Bus, B. Todo el Dominio



Simulación Dominio Túnel de viento

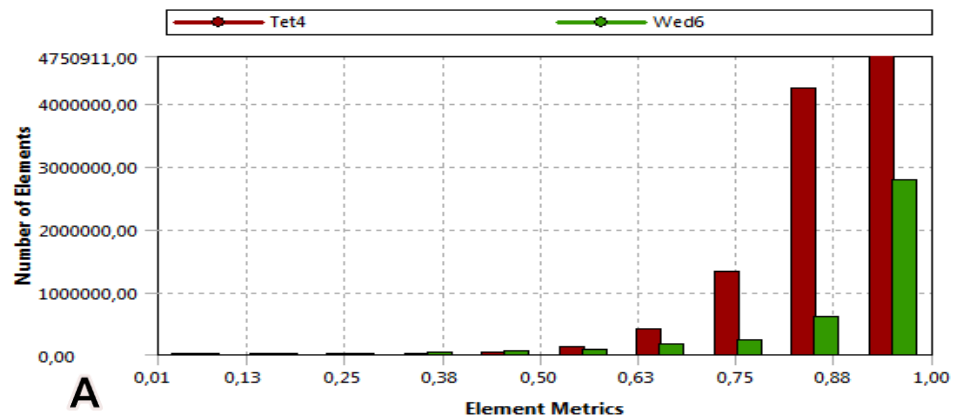
Características de las Mallas.

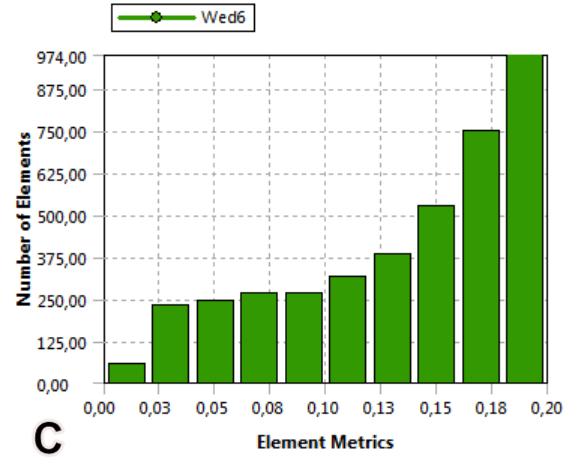
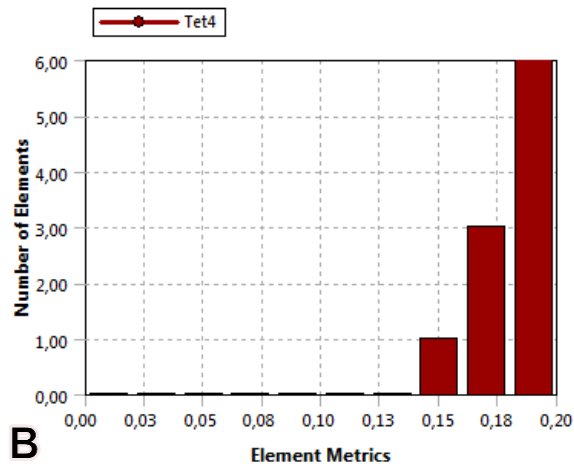
Número de Elementos	Número de Nodos	Calidad de la Malla			Resultados (N)			
		Oblicuidad	Ortogonalidad	Y+	Iteraciones Realizadas	Drag	Fuerza por Presión	Fuerza por viscosidad
		Max	Min	Promedio				
1224431	218331	0,9725	0,0914	--	1939	4,2964	3,7242	0,5722
5228437	1165904	0,9617	0,0388	4,7317	1101	3,9397	3,0728	0,867
6786938	2156028	0,9880	0,0103	2,4974	1500	4,1776	3,0852	1,0924
11160601	3043856	0,9242	0,0119	4,2380	2176	4,0050	2,9996	1,0054
14672191	3828700	0,9607	0,0101	3,9761	2156	4,0390	2,9834	1,0556
16351062	4248265	0,9607	0,0144	3,7921	2001	4,0549	2,9878	1,0672

Fuente. Autores

➤ Características Malla Óptima

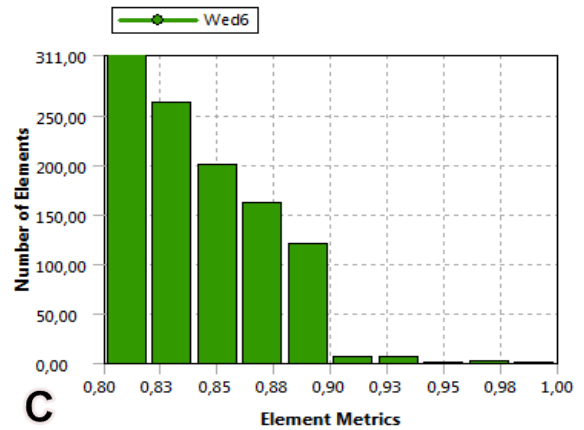
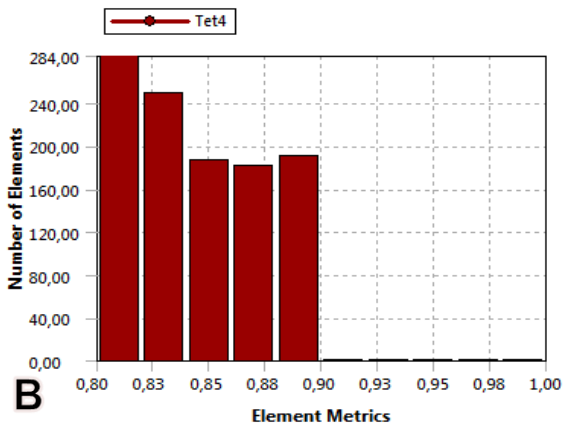
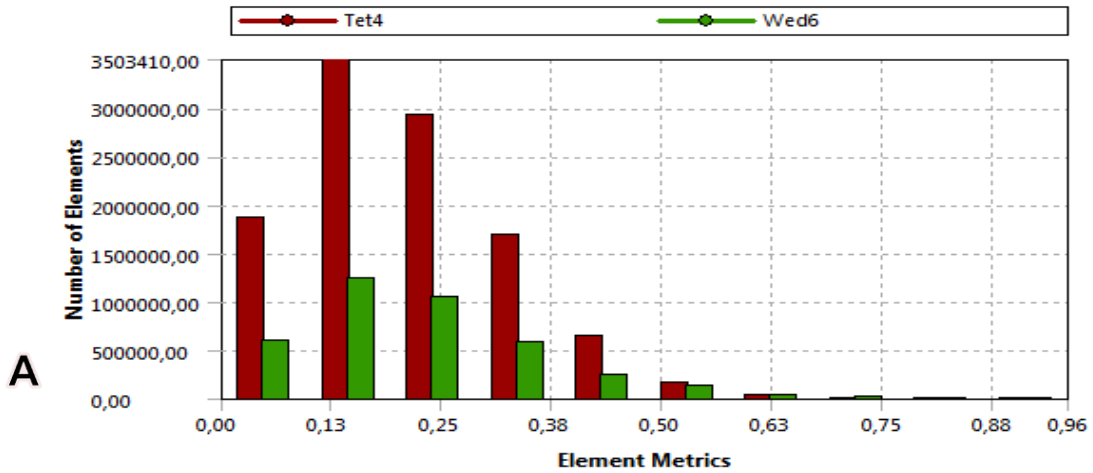
A. Histograma de calidad de Ortogonalidad. Histograma de baja calidad de Ortogonalida, B. Tetraedros, C. Prismas.





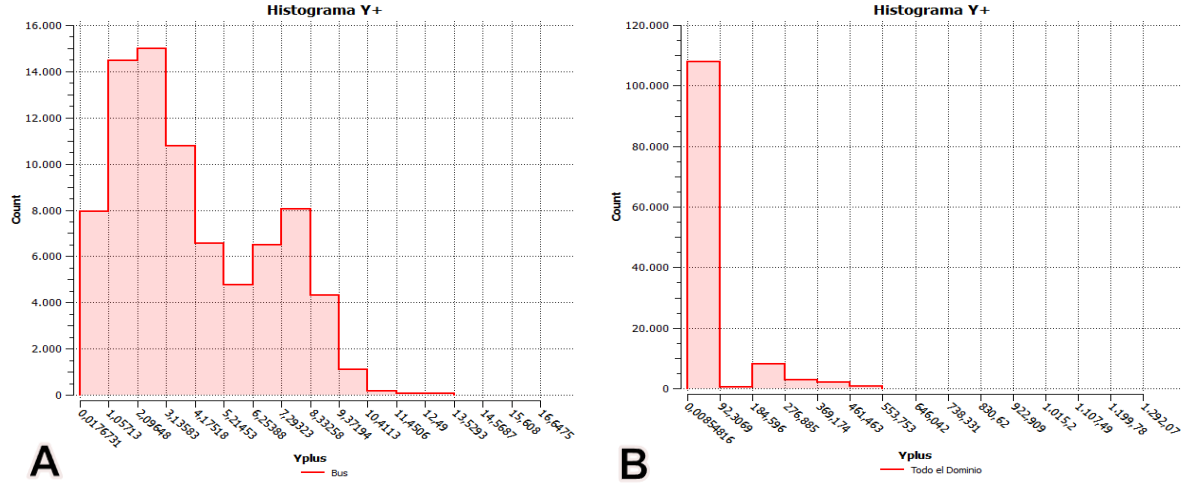
Fuente. Autores.

A. Histograma de calidad de Oblicuidad. Histograma de baja calidad de Oblicuidad,
B. Tetraedros, C. Prismas.



Fuente. Autores.

Histograma Y+, A. Bus, B. Todo el Dominio.



Simulación Dispositivo 1

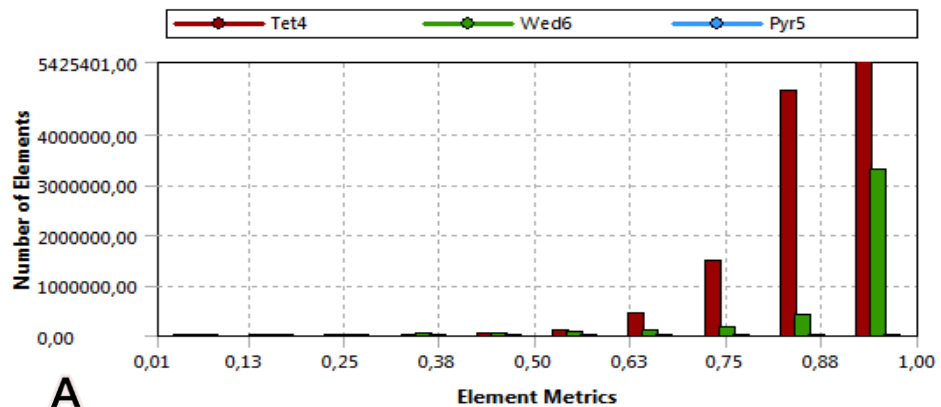
Características de las Mallas

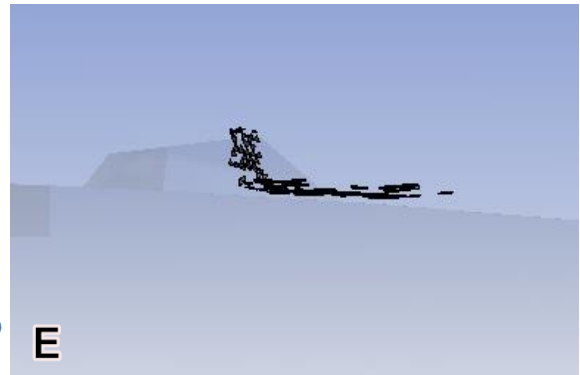
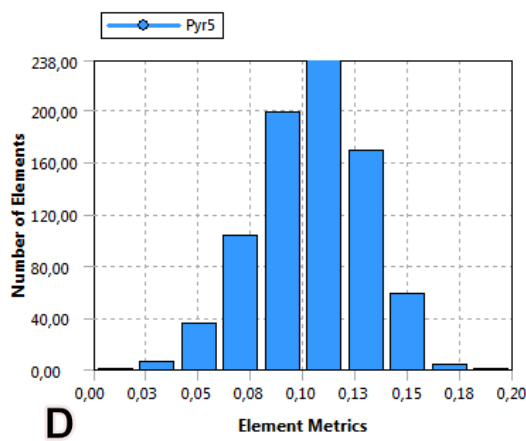
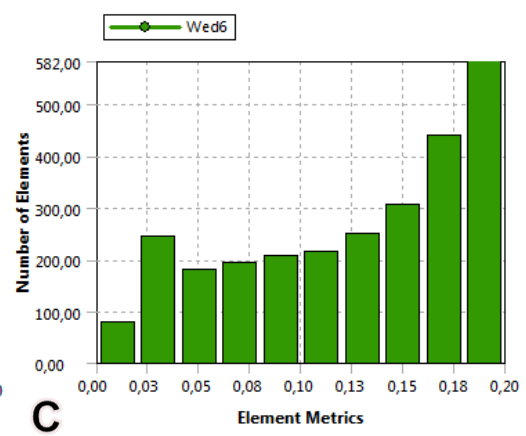
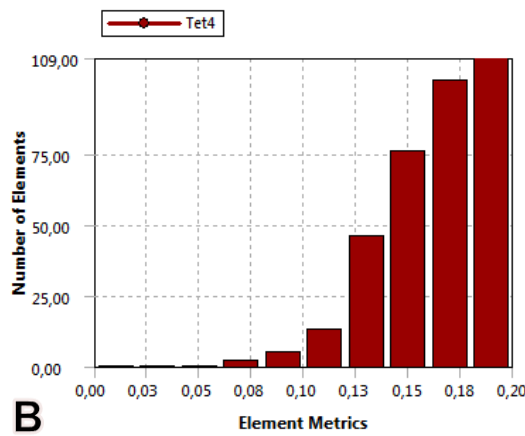
Calidad de la Malla					Resultados (N)			
Número de Elementos	Número de Nodos	Oblicuidad	Ortogonalidad	Y+	Iteraciones Realizadas	Drag	Fuerza por Presión	Fuerza por viscosidad
		Max	Min	Promedio				
4752087	1279589	0,9371	0,0153	6,5876	1152	3,9901	3,2924	0,6976
6898631	1950654	0,9502	0,0119	5,7799	2234	3,9550	3,1366	0,8184
9559593	2926623	0,9665	0,0121	3,9860	2341	4,0370	3,0162	1,0208
11925462	3397483	0,9669	0,0111	3,7452	726	4,0803	3,0536	1,0266
16320252	4184526	0,9715	0,0055	3,8345	2308	4,0737	3,0142	1,0596

Fuente. Autores.

➤ Características Malla Óptima

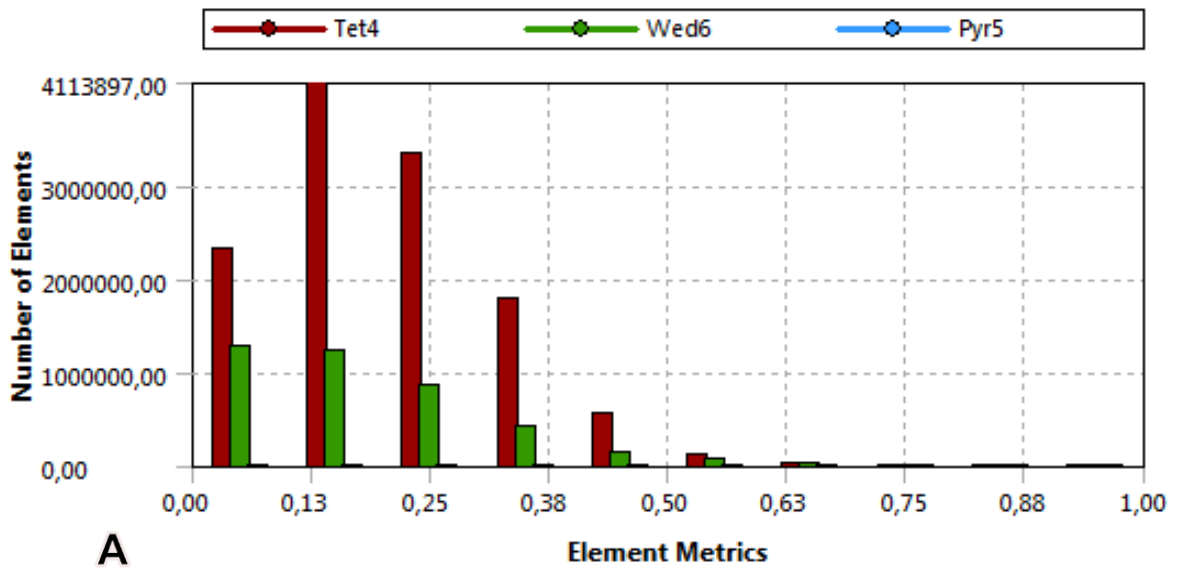
A. Histograma de calidad de Ortogonalidad. Histograma de baja calidad de Ortogonalidad, B. Tetraedros, C. Prismas, D. Pirámides. E. Elementos de baja calidad.

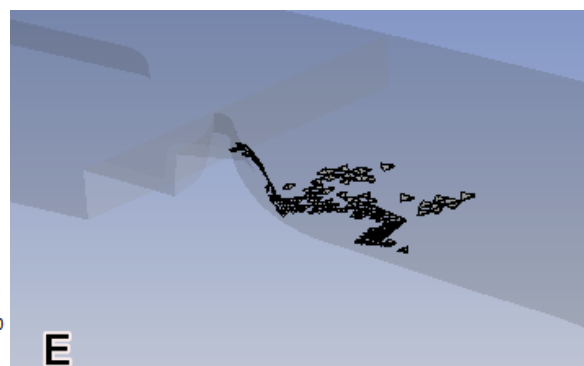
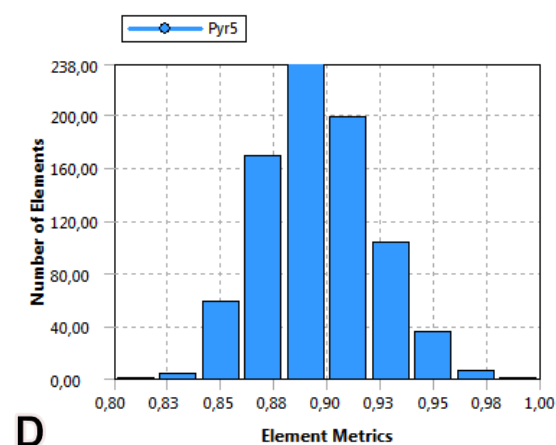
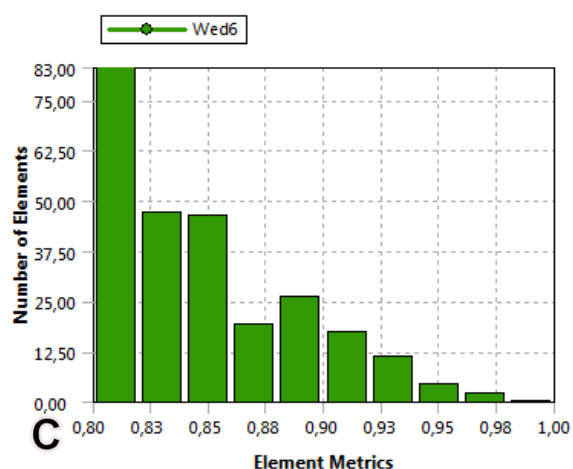
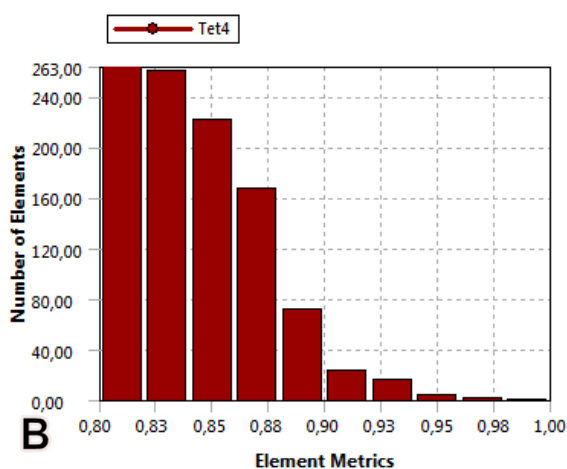




Fuente. Autores.

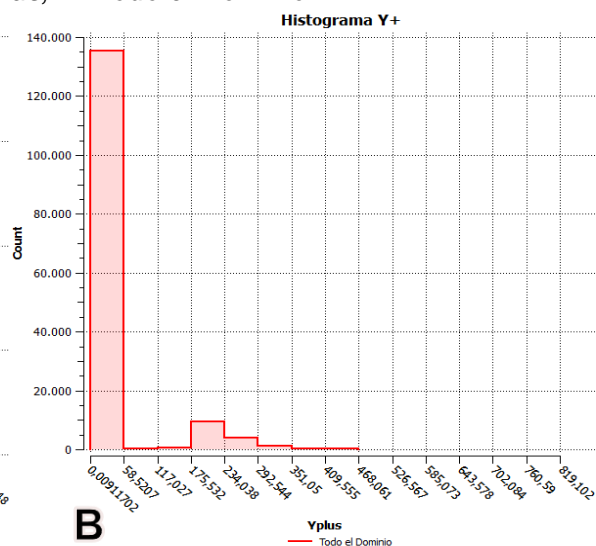
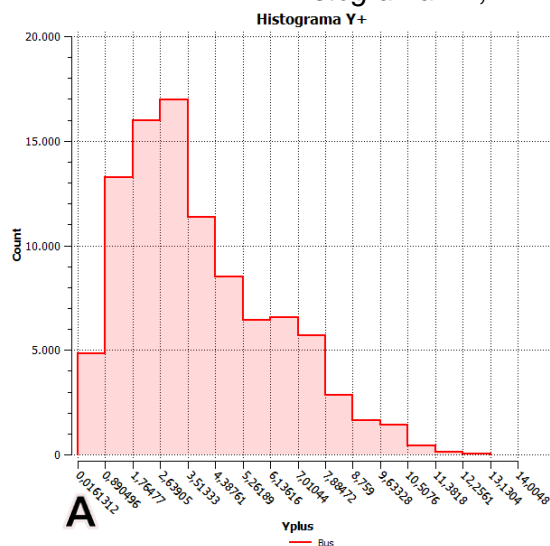
A. Histograma de calidad de Oblicuidad. Histograma de baja calidad de Oblicuidad, B. Tetraedros, C. Prismas, D. Pirámides. E. Elementos de baja calidad.





Fuente. Autores.

Histograma Y+, A. Bus, B. Todo el Dominio.



Fuente. Autores.

Simulación Dispositivo 2

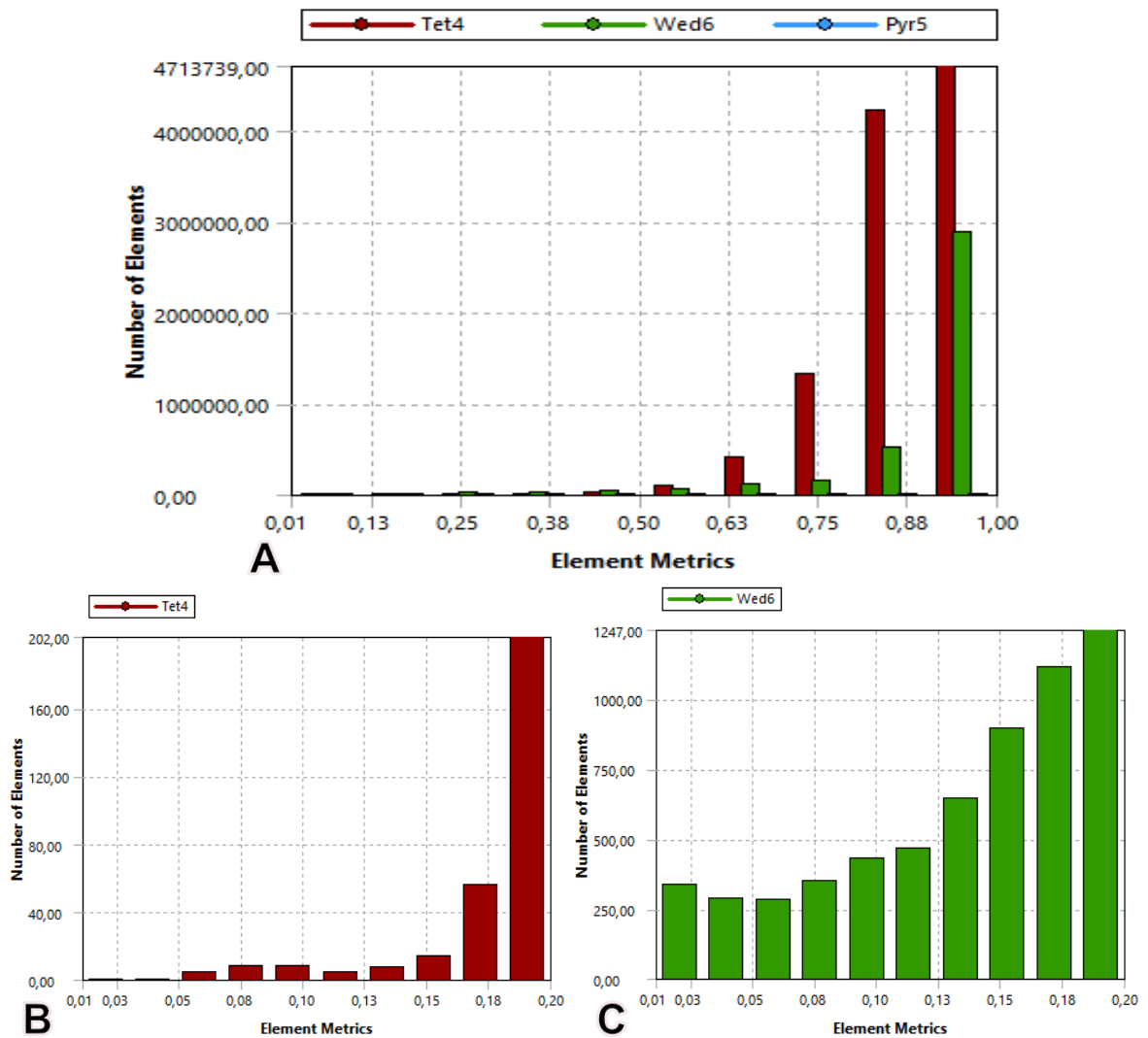
Características de las Mallas.

Calidad de la Malla					Resultados (N)			
Número de Elementos	Número de Nodos	Oblicuidad	Ortogonalidad	Y+	Iteraciones Realizadas	Drag	Fuerza por Presión	Fuerza por viscosidad
		Max	Min	Promedio				
5824562	1566273	0,9363	0.0128	8,2156	2766	3,8872	3,1385	0,7487
9095083	2491003	0,9694	0,0103	4,4542	1914	4,0349	3,0228	1,0121
10645471	2984726	0,9694	0,0107	4,3405	3103	4,0519	3,0353	1,0167
14518623	3776787	0,9701	0,0108	4,2880	1684	4,0677	3,0109	1,0568

Fuente. Autores.

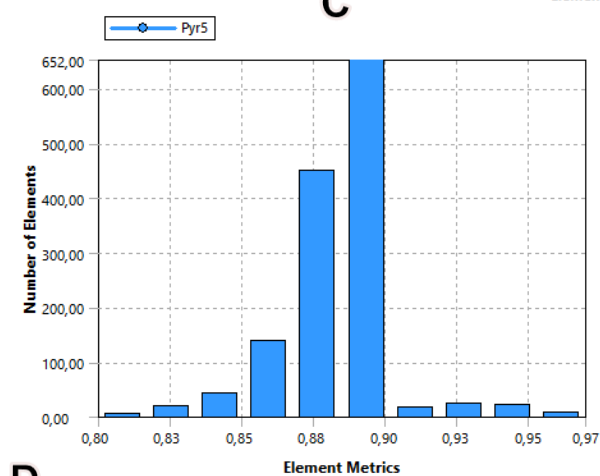
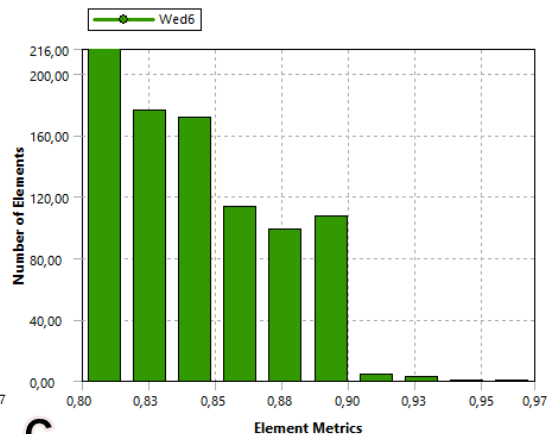
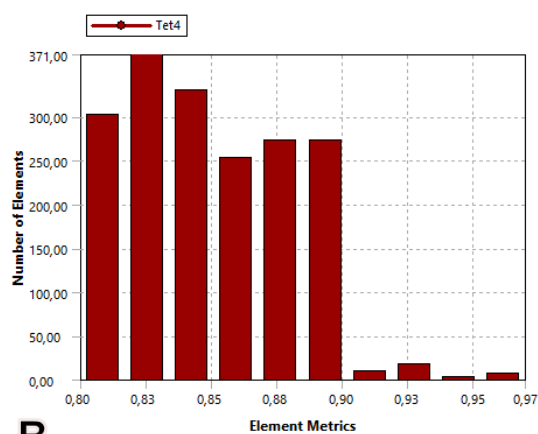
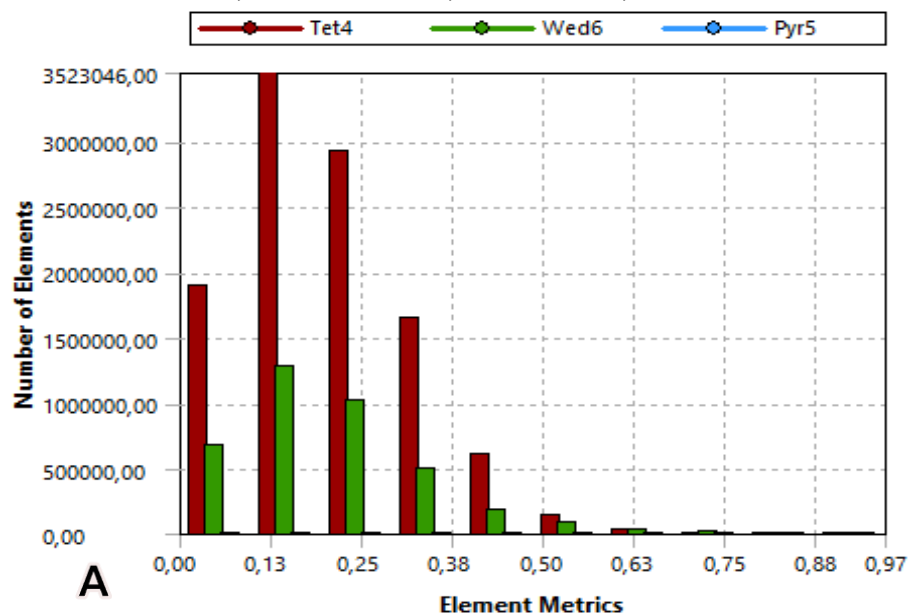
A. Histograma de calidad de Ortogonalidad. Histograma de baja calidad de Ortogonalidad,

B. Tetraedros, C. Prismas.



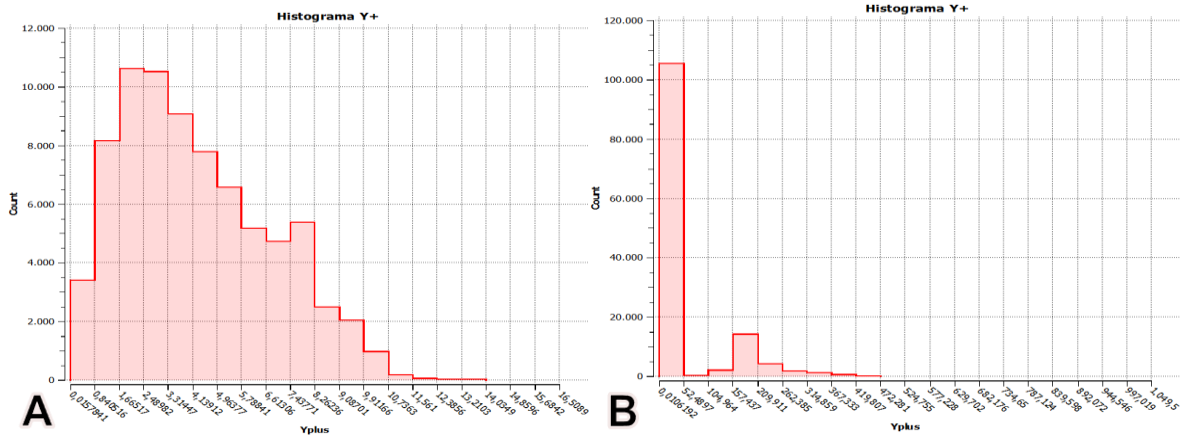
Fuente. Autores

A. Histograma de calidad de Oblicuidad. Histograma de baja calidad de Oblicuidad, B. Tetraedros, C. Prismas, D. Pirámides.



Fuente. Autores

Histograma Y+, A. Bus, B. Todo el Dominio.



Fuente. Autores

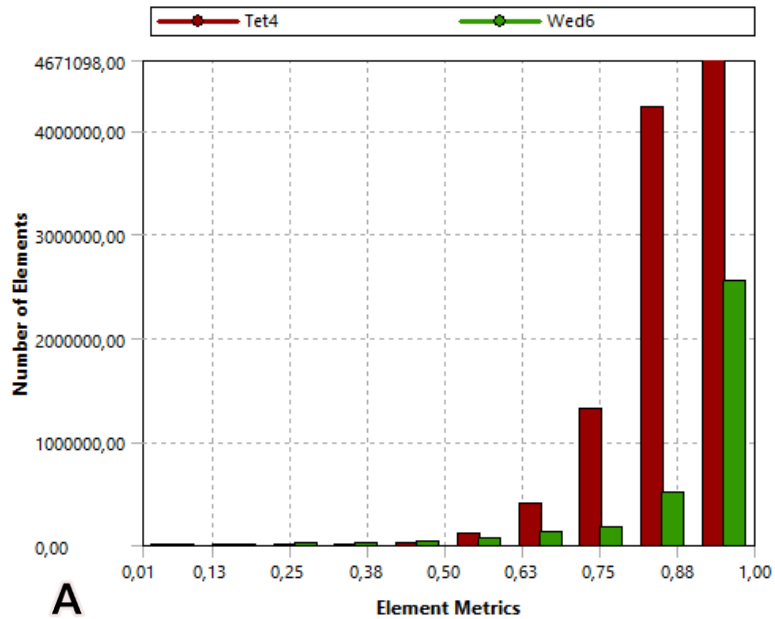
Simulación del Dispositivo 3

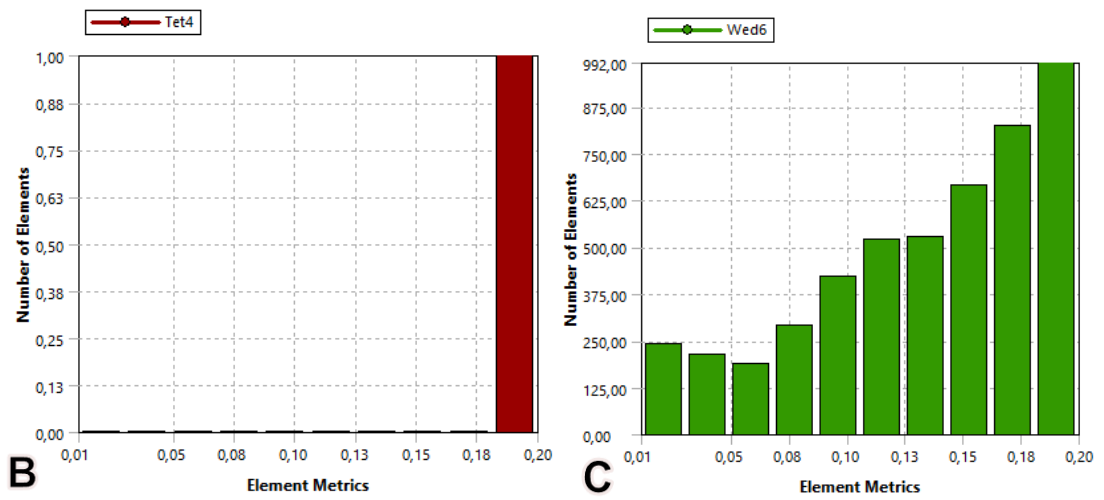
Características de las Mallas.

Calidad de la Malla					Resultados (N)			
Número de Elementos	Número de Nodos	Oblicuidad	Ortogonalidad	Y+	Iteraciones Realizadas	Drag	Fuerza por Presión	Fuerza por viscosidad
		Max	Min	Promedio				
5629863	1299058	0,95522	0,01312	10,3891	1708	3,9217	3,2229	0,6988
10398229	2832764	0,95515	0,01058	4,10865	1586	4,0567	3,0264	1,0302
14153999	3609310	0,95511	0,01083	4,09725	2839	4,0962	3,0162	1,0799
17209396	4449141	0,95508	0,01061	3,98132	1479	4,0987	3,0146	1,0842

Fuente. Autores.

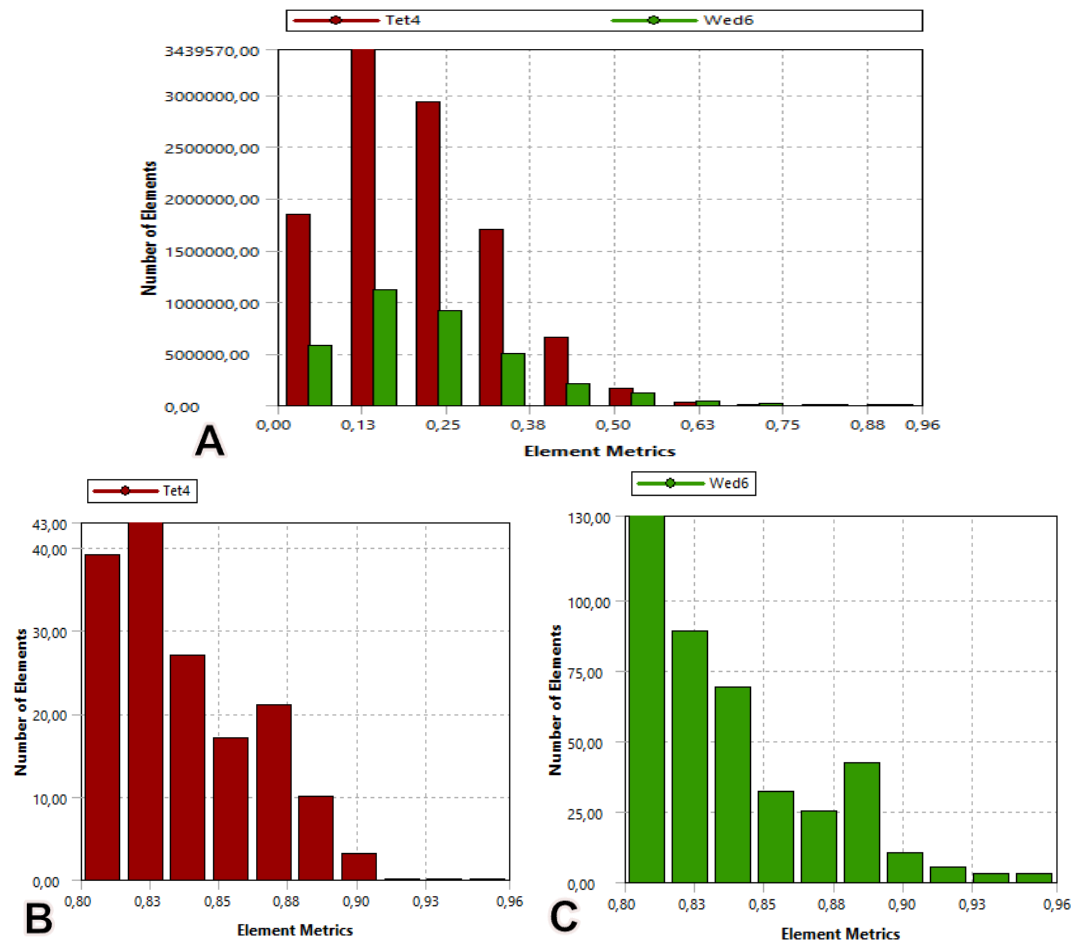
A. Histograma de calidad de Ortogonalidad. Histograma de baja calidad de Ortogonalidad, B. Tetraedros, C. Prismas.





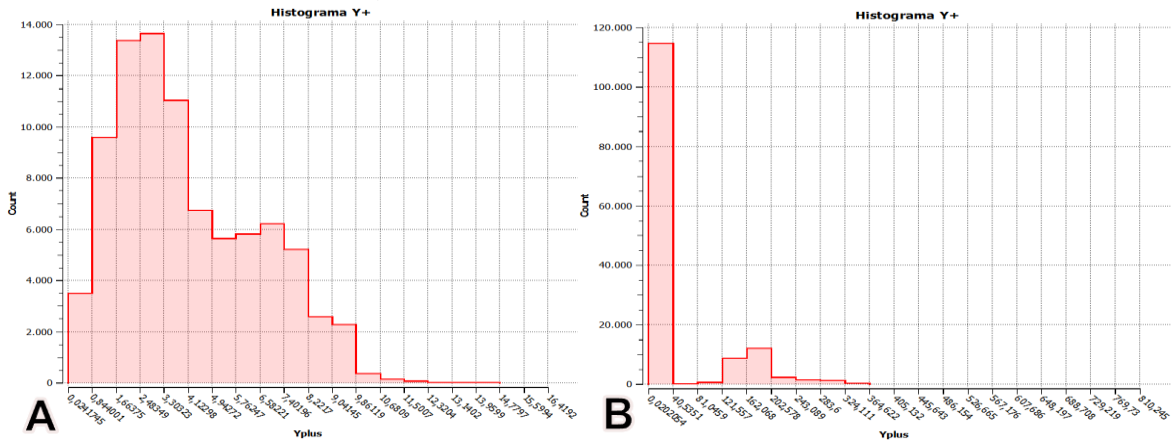
Fuente. Autores

A. Histograma de calidad de Oblicuidad. Histograma de baja calidad de Oblicuidad, B. Tetraedros, C. Prismas



Fuente. Autores

A. Histograma Y+, A. Bus, B. Todo el Dominio.



Fuente. Autores

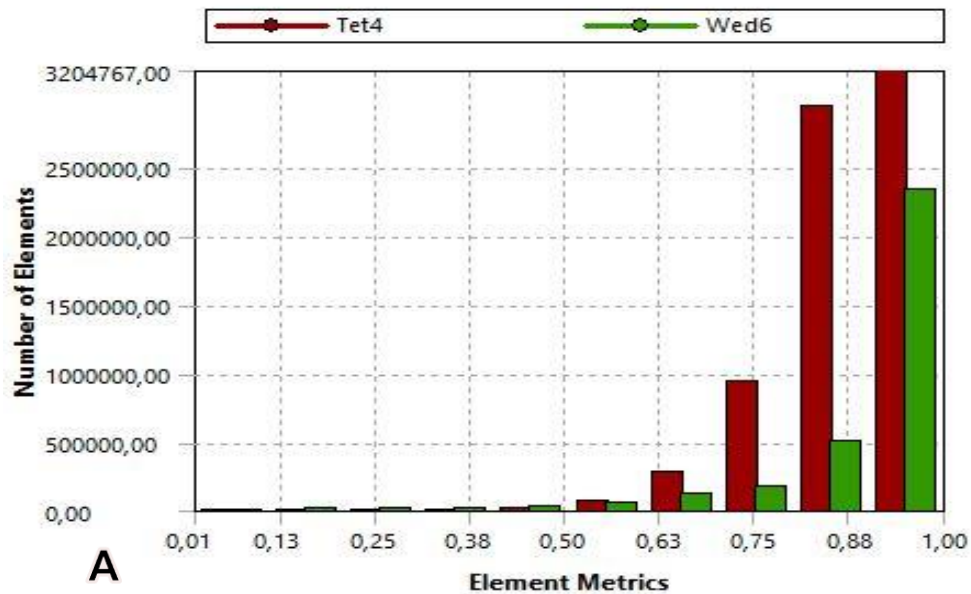
Simulación Dispositivo 4

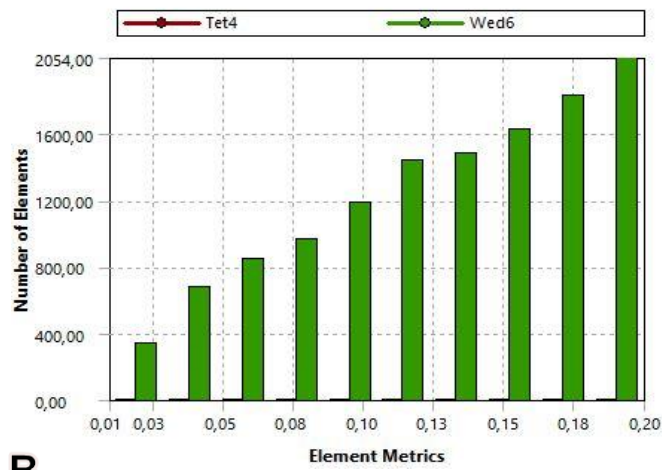
Características de las Mallas.

Calidad de la Malla					Resultados (N)			
Número de Elementos	Número de Nodos	Oblicuidad	Ortogonalidad	Y+	Iteraciones Realizadas	Drag	Fuerza por Presión	Fuerza por viscosidad
		Max	Min	Promedio				
5607345	2163436	0,9371	0,0077	5,5679	1850	4,4337	3,3493	1,0844
10688546	2952292	0,9574	0,0096	3,9074	2698	4,1582	3,1024	1,0558
14398536	3728803	0,9598	0,0115	3,7502	2350	4,2071	3,1073	1,0998
17608659	4505288	0,9552	0,0107	3,7477	1700	4,1454	3,0926	1,0529

Fuente. Autores

A. Histograma de calidad de Ortogonalidad. Histograma de baja calidad de Ortogonalidad, B. Tetraedros y Prismas.

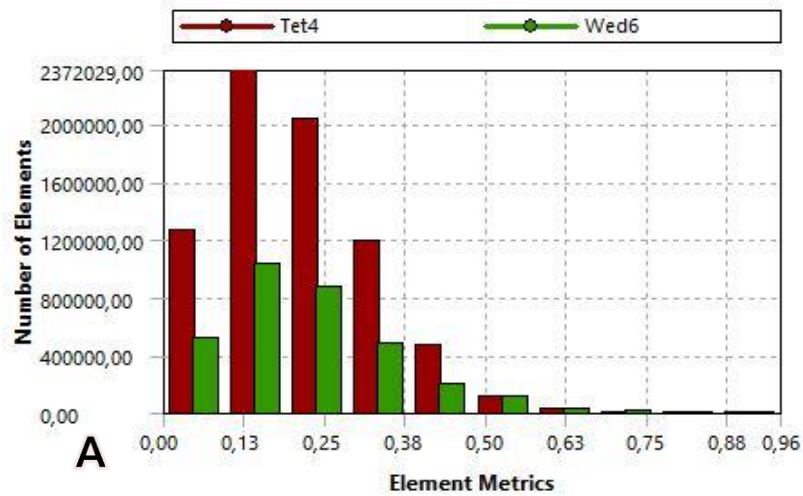




B

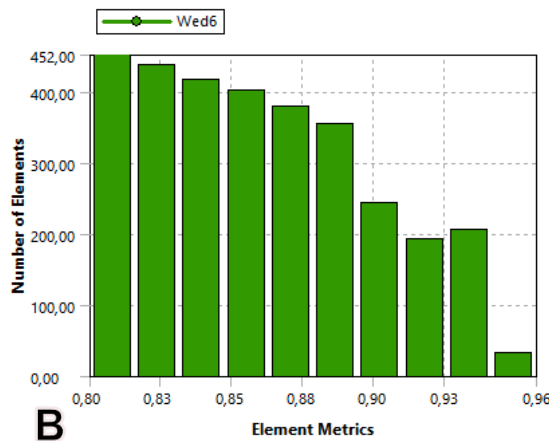
Fuente. Autores

A. Histograma de calidad de Oblicuidad. Histograma de baja calidad de Oblicuidad, B. Tetraedros, C. Prismas.



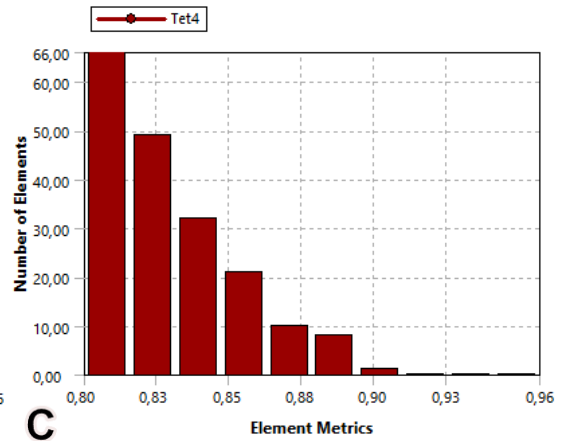
A

Fuente. Autores



B

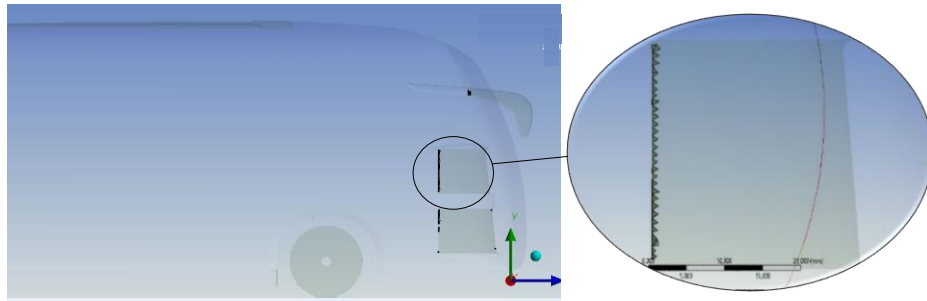
Fuente. Autores



C

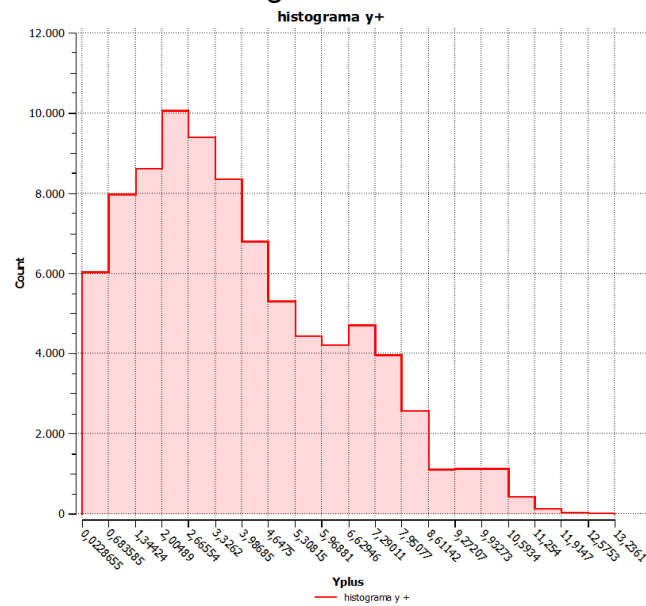
Fuente. Autores

Ubicación elementos de calidad menor Laterales



Fuente. Autores

Histograma Y+ Bus



Fuente. Autores